

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования**

«Тамбовский государственный технический университет»

А.П.ПУДОВКИН, Ю.Н. ПАНАСЮК, С.П. МОСКВИТИН

РАДИОТЕХНИКА

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ

Учебно-методическое пособие



Тамбов
Издательство ТГТУ
2014

УДК 621.37 (076)

ББК 384я73

П-88

Рекомендовано Редакционно-издательским советом ТГТУ

Рецензенты:

к.х.н., доцент, декан факультета «Магистратура»

О.А.Корчагина

к.т.н., доцент, доцент кафедры общей физики ТГУ имени Г.Р.

Державина Штейнбрехер В.В.

П-88 Радиотехника. Общенаучный цикл подготовки. Учебно-методическое пособие / сост. А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, С.П. Москвитин – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2014. – 75 с. – 50 экз.

В пособии представлены программа, план лекционных и практических занятий, учебные материалы по курсам «История и методология науки и техники (применительно к радиотехнике)» и «Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС».

Рассматриваются этапы становления и развития радиотехники, место и значение радиотехники и смежных с ней областей (включая информационные технологии) в современном мире, а также теоретические основы системного подхода к проблеме электромагнитной совместимости, видов помех, методов борьбы с помехами, технических способов и средств защиты от помех, обеспечения и технических способов ЭМС, организационных мероприятий обеспечения ЭМС.

Предназначено для магистров, обучающихся по направлению 210400 «Радиотехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.37 (076)

ББК 384я73

© ГОУ ВПО Тамбовский государственный
технический университет (ТГТУ), 2014

©Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Москвитин С.П.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. История и методология науки и техники (применительно к радиотехнике)	4
1.1 Тематический план курса история и методология науки и техники (применительно к радиотехнике).....	5
1.2 Содержание практических (семинарских) занятий	5
1.3 Темы рефератов или докладов	15
1.4 Методические рекомендации по составлению реферата	16
РАЗДЕЛ 2. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС.....	19
2.1 Проблема электромагнитной совместимости РЭС	19
2.2 Пассивные и активные помехи	23
2.3 Методы борьбы с организованными помехами	35
2.4. Обеспечение ЭМС РЭС	61
Заключение	72
Список рекомендуемой учебной и научной литературы	73

Раздел 1. ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОТЕХНИКЕ)

Наука, техника и технология в современном мире представляют собой комплекс взаимодействующих факторов определяющих основные тенденции развития человечества. Современная наука из системы отвлеченного, незаинтересованного, абстрактного знания о мире превратилась в поставщика идей для развития техники. Изменение типа взаимодействия привело к появлению новой сферы применения научных знаний – рационализации производства на основе выявленных в ходе исследований эмпирических закономерностей и теоретических моделей. Новые технологии стали символом технического прогресса.

Радиотехника как область знаний и практической деятельности человека за сто с лишним лет своего развития прошла огромный путь – от первой системы беспроводной передачи сигналов до современных наземных и космических радиосистем.

Наиболее существенным результатом курса следует считать усвоение базовых представлений и теоретических понятий. Эти первоначальные сведения по методологии науки и техники, дополненные на практических занятиях (семинарах) анализом конкретных научных открытий, технических изобретений и технологических разработок будут способствовать появлению интереса к самостоятельной работе у студентов. Студенты при этом приобретают навыки работы с первоисточниками, у них формируется устойчивый интерес к самостоятельной научно-исследовательской работе.

Курс «История и методология науки и техники (применительно к радиотехнике)» рассчитан на 18 лекционных часов и 36 часов практических занятий в форме семинаров. Изучение курса предполагает внимательное прослушивание лекций, активное участие в семинарах, самостоятельную работу (не менее 54 часов), в том числе самостоятельную работу с первоисточниками, оригинальными текстами и другой литературой по предмету. Одной из форм самостоятельной работы студентов является подготовка рефератов или докладов. Предусмотрена также итоговая аттестация.

1.1 ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН КУРСА ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОТЕХНИКЕ)

Распределение часов по темам и видам работ

№	Название темы	Лекции	Практические занятия	СР	
1.	Эволюция полевых и волновых концепций теории электромагнетизма	2	4	6	12
2	Создание Максвеллом теории электромагнитного поля, вклад в нее Герца и Хевисайда	2	4	6	12
3	Основные изобретения, предварившие создание действующих линий радиосвязи	2	4	6	12
4	Роль А.С.Попова и Г.Маркони	2	4	6	12
5	Развитие «доэлектровакuumной» радиотехники	2	4	6	12
6	Основные направления развития радиотехники до второй мировой войны	2	4	6	12
7	Роль радио во второй мировой войне	2	4	6	12
8	Развитие радиотехники после войны	2	4	6	12
9	Последовательные революционные изменения элементной базы. Роль цифровых и компьютерных технологий в развитии радиоэлектроники	2	4	6	12
Всего		18	36	54	108

1.2 СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ (СЕМИНАРСКИХ) ЗАНЯТИЙ

Тема 1. Эволюция полевых и волновых концепций теории электромагнетизма (4 часа)

Вопросы:

1. Представление об электрических и магнитных явлениях в античном мире.
2. Эпоха возрождения и наука об электричестве и магнетизме.
3. Опыты Гальвани и Вольты.
4. Работы Фарадея и Ампера.

Методические рекомендации

Наука – это один из видов знания, характеризующийся рациональностью, объективностью, эмпирической проверяемостью. Понятие эмпирического знания. Теоретический уровень научного исследования. Наука и квазинаука, антинаука, псевдонаука. Наука и обыденный опыт, его значение для научного исследования. Наука и мифология: иррациональные и рациональные стороны мифологического постижения мира. Мифологические элементы в науке. Формализованный язык науки и символический язык искусства. Художественно-эстетическое познание – эмоционально-чувственное и интуитивное постижение мира. Формирование логических норм научного мышления и профессиональных сообществ ученых в средневековых университетах. Общества экспериментаторов. Академии и научные общества XVII-XVIII в. Лондонское Королевское общество развития естественных наук. Французская Королевская Академия наук. Возникновение дисциплинарно-организованной науки: научные сообщества и исследовательские институты XIX-XX вв. Научная элита. Нейтральность науки и «социальный заказ».

Определение техники: узкая и широкая дефиниции. Разные версии концептуального осмысления техники. Техника как продолжение естественных органов человека. Техника – искусственная природа, противостоящая человеку и естественной природе. Техника как мир овеществленных, материализованных понятий. Исторические этапы развития техники. Инженерная деятельность и ее взаимосвязь с научной деятельностью.

Первые сведения об электрических и магнитных явлениях были известны уже в древности. Как правило, они были получены в результате хозяйственной деятельности человека, а также в результате случайных наблюдений. Так, древним ученым было известно свойство натертого янтаря притягивать легкие предметы (слово «электричество» происходит от греческого слова «электрон», что значит янтарь). Древние греки знали, что существует особый минерал - железная руда (магнитный железняк), способный притягивать железные предметы. А китайцам давно было известно свойство куска магнитного железняка ориентироваться в определенном направлении

относительно частей света, что было использовано для устройства компаса.

Исследование электрических и магнитных явлений в XVI – XVIII веках. Первые систематические исследования электричества и магнетизма. Изобретение лейденской банки. Создание «унитарной теории» Б. Франклина. Возникновение и развитие электростатики. Установление закона Кулона. Разработка математической теории электричества и магнетизма. Возникновение и развитие электродинамики. Открытие гальванического элемента. Опыты Эрстеда. Установление закона Ампера. Установление законов постоянного тока. Открытие электромагнитной индукции. Практическое применение открытий в области электродинамики. Теория электромагнитного поля Максвелла. Признание электромагнитного поля как самостоятельной физической реальности.

Тема 2. Создание Максвеллом теории электромагнитного поля, вклад в нее Герца и Хевисайда (4 часа)

Вопросы:

1. Обобщение Максвеллом экспериментальных законов Ампера и Фарадея, революционная роль электрического тока смещения.
2. Математический аппарат, использованный Максвеллом.
3. Работы Герца по экспериментальному подтверждению теории Максвелла.
4. Вклад Хевисайда в математическую формулировку уравнений Максвелла.

Методические рекомендации

Исследование взаимодействия зарядов, проводившееся в XIX в. Электромагнитная модель: электрическое, магнитное и электромагнитные поля. Доказательством этих утверждений являются работы выдающегося английского физика М. Фарадея. Поле неподвижных зарядов получило название электростатического. Электрический заряд, находясь в пространстве, искажает его свойства, т.е. создает поле. Силовой характеристикой электростатического поля является его напряженность \vec{E} . Электростатическое поле является потенциальным. Его энергетической характеристикой служит потенциал ϕ . Силовой характеристикой магнитного поля является напряженность \vec{H} . В отличие от незамкнутых линий электрического поля силовые линии магнитного поля замкнуты, т.е. оно является вихревым.

Новый раздел науки об электричестве – электродинамика. Законы Ома, Джоуля-Ленца - важнейшие открытия в области

электричества. Исследования английского физика М.Фарадея (1791-1867 гг.) - определенная завершенность изучению электромагнетизма. Теорию поля Д. Максвелла. Система знаменитых уравнений - суть теории Максвелла.

Уравнение Утверждение

$\operatorname{div} E \sim q$ Электрическое поле, соответствующее какому-либо распределению заряда, определяется из закона Кулона

$\operatorname{div} H = 0$ Магнитные заряды не существуют

$I \approx \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ Переменное магнитное поле возбуждает электрический ток

$\vec{H} \approx I + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ Магнитное поле возбуждается токами и переменными электрическими полями

Свет – разновидность электромагнитных волн. Экспериментальное подтверждение теории Дж. Максвелла Генрихом Герцем. Доказательство тождества электромагнитных волн и света. Знаменитые опыты Герца по распространению электрической силы. Экспериментальный аппарат Герца 1887 года. Простейший резонатор. Основные выводы Герца по результатам эксперимента. Открытие внешнего фотоэффекта. Выражение закона сохранения энергии, полученное Хевисайдом.

Тема 3. Основные изобретения, предварившие создание действующих линий радиосвязи (4 часа)

Вопросы:

1. Работы Лоджа, Бранли, Бьеркнеса, Томсона, Блондло, Феддерсена по созданию теоретических и экспериментальных разработок элементов устройств для генерации и приема электромагнитных колебаний.

Методические рекомендации

Изобретение французского физика Э. Бранли *радиокондуктор* – первый детектор электромагнитных волн. Эбонитовая трубочка, заполненная металлическим порошком ($R \sim 10^6$ Ом), включалась в цепь батарейки и гальванометра. Если рядом происходил искровой разряд лейденской банки, стрелка гальванометра заметно отклонялась, т. к. сопротивление падало до $\sim 10^2$ Ом. О. Лодж назвал это устройство *когерером*.

Однако ближе всех к идее создания беспроводного телеграфа подошёл английский профессор О. Лодж в 1894 г. Ему принадлежат:

- идея использования когерера Бранли для регистрации электромагнитных волн (Лодж объяснил физическое явление когеризации – сцепления – мелких металлических частиц действием высокочастотных токов, возбуждаемых электромагнитной волной);

- способ «декогерирования» с помощью лёгких ударов молоточка, приводимого в движение часовым механизмом от аппарата Морзе;

- приём и передача сигналов на расстояние до 55 м;

- демонстрация возможности телеграфирования сигналов азбукой Морзе.

Основные вопросы лекции О. Лоджа, прочитанная в лондонском Королевском институте летом 1894 г.:

- излучение и детектирование ЭМВ;

- свойства этих волн (отражение, преломление, поляризация и т. п.);

- их действие (биологическое, намагничивающее и, как его назвали позже, фотоэлектрическое).

Работы Томсона по изучению прохождения электрического тока через газы. Опыты Томсона по изучению катодных лучей. Доказательство Томсоном корпускулярную (электронную) природу катодных лучей. Первая модель построения атома.

Блондло Рене Проспер (3.07 1849 - 24.11. 1930) — французский физик, член Парижской АН (1894). Работы посвящены термодинамике, электромагнетизму, оптике. Метод определения скорости распространения электромагнитных волн. Метод передачи электромагнитных волн вдоль металлических проводов. Опыты с диэлектриками, движущимися в электромагнитных полях. Исследование фотоэффекта.

Работы **Феддерсена Б. В.** относятся к исследованию электрических колебаний и волн, диффузии газов, магнетизму. Изучение (1858 — 62) разряда лейденской банки, установление его колебательный характер и пропорциональность периода колебаний корню квадратному из емкости конденсатора. Исследование (1859) ферромагнитных свойств вещества в быстропеременных полях. Открытие (1873) явления термодиффузии.

Тема 4. Роль А.С.Попова и Г.Маркони (4 часа)

Вопросы:

1. Работы А.С.Попова по созданию основных элементов линий радиосвязи и экспериментам с ними.

2. Практическое использование его работ на флоте.

3. Эксперименты Г.Маркони, внедрение их результатов в промышленности.

4. Разработки систем трансатлантической радиосвязи.

Методические рекомендации

Способ беспроводной передачи сообщений на расстояние посредством электромагнитных волн (радиоволн), изобретённый русским учёным А.С. Поповым в 1895 г. Область науки и техники, связанная с изучением физических явлений, лежащих в основе этого способа, и с его использованием в связи, вещании, телевидении, локации и т.д.

Более надёжный и чувствительный способ регистрации электромагнитных волн. Конструкция когерера. Повышение чувствительности аппарата. Первая демонстрация передачи сигналов на расстояние 250 м. Обнаружение Поповым явления отражения волн от предметов – основа радиолокации. Установление связи на расстоянии 600 м, 20 км и 150 км. Новая конструкция передатчика. Начало внедрение радиосвязи на флоте и в армии России. Возможность слухового радиоприема с использованием телефона в качестве воспроизводящего устройства. Первый опыт боевого применения систем радиосвязи А. С. Попова был получен в ходе Русско-японской войны 1904-1905 гг.

Опыты Г. Маркони, итальянского физика, инженера и предпринимателя с электромагнитными волнами. Широкое практическое применение нового способа связи - радиосвязь через Атлантический океан. Разработки систем трансатлантической радиосвязи.

Тема 5. Развитие «доэлектривакуумной» радиотехники (4 часа)

Вопросы:

1. Искровые генераторы, работы Брауна, Попова, Вина.
2. Генераторы незатухающих колебаний, работы Тесла, Фессендена, Паульсена (дуговые источники), Тесла, Алесандерсона, В.П.Вологодина (машинные генераторы).
3. Работы в области приемных устройств М.В.Шулейкина, Н.Н. Циклинского, Флеминга.

Методические рекомендации

Эксперименты Герца в течение начального периода развития беспроводной связи (в качестве передатчика использовался искровой разрядник, питаемый катушкой Румкорфа). Предложение немецкого физика К. Ф. Брауна возбуждать антенну через систему

связанных контуров. С современной точки зрения, эта система представляла собой полосовой фильтр, пропускавший в антенну только часть спектра. Передатчики по схеме Брауна позволили значительно увеличить дальность связи.

Однако использование простых разрядников ввиду их низкой эффективности (большие потери при возбуждении искры, большое время гашения искры) тормозило дальнейшее развитие техники передачи. Предложение в 1902 г. немецким физиком Максом Вин использовать разрядник из нескольких последовательно включенных искровых промежутков и питать первичную обмотку катушки Румкорфа от генератора переменного тока с частотой порядка нескольких сотен герц. Другой способ быстрого гашения разряда - использование вращающихся разрядников (Никола Тесла). Попытки использовать искровую технику для передачи звуковых сигналов. Телефонный приемник, разработанный А.С.Поповым.

Электрическая дуга была изобретена в 1802 г. русским ученым В. В. Петровым.

Первые технические применения дуги были связаны с системами электрического освещения. Одним из сопутствующих явлений и таких системах являлся звук, создаваемый дугой при ее работе. Частота его находилась в спектре частот, воспринимаемым человеческим ухом. Исследование дуговых генераторов показало, что возможны разные режимы их работы: режим колебаний *первого рода*, когда постоянная составляющая тока дуги больше переменной и колебания имеют гармонический характер; режим колебаний *второго рода*, когда ток течет только в одном направлении, колебания периодические, но не гармонические (присутствуют высшие гармоники); режим колебаний *третьего рода*, когда характер колебаний напоминает искровой генератор. Эти режимы напоминают режимы работы ламповых генераторов: сильно *недонапряженный*, с небольшой положительной обратной связью, *перенапряженный* с сеточными токами и высоким КПД и *сильно перенапряженный*, когда возможны релаксационные колебания.

Для дуговых генераторов чаще всего использовался режим *второго рода*.

Работы русских инженеров М. В. Шулейкина (1884—1939), Н. Н. Циклинского (1884—1936) по повышению мощности передатчика с многократным разрядником. Научно обоснованный расчет многократных разрядников М. В. Шулейкиным и И. Г. Фрейманом позволил сконструировать искровые радиостанции оптимальной мощности.

Тема 6. Основные направления развития радиотехники до второй мировой войны (4 часа)

Вопросы:

1. Изобретение аудиона (триода) Ли де Форестом, лампового генератора Мейснером.
2. Работы Э. Армстронга по созданию ламповых радиоприемников.
3. Разработка многоэлектродных приемно-усилительных и мощных генераторных радиоламп.
4. Освоение диапазона коротких волн, роль радиолюбителей. Работы в области телевидения, работы в области ультракоротких волн.
5. Создание принципиально новых электровакуумных приборов – магнетронов и клистронов.
6. Начало работ в области радиолокации и радионавигации.

Методические рекомендации

Интересы Фореста к беспроводной телеграфии. Новшество Де Фореста - аудион. Первый передатчик и приемник Де Фореста. Форесту не нравился термин «беспроводной», и он выбрал и ввёл новое название «радио». Супергетеродинный приёмник изобрёл американец Эдвин Армстронг в 1918 году. Преимущества и недостатки ламповых радиоприемников.

Переломный момент в истории ранней любительской радиосвязи - "Закон о радио" 1912 года (RadioAct 1912), принятый Конгрессом США. Первый отечественный дореволюционный радиолюбитель. Декрет "О радиостанциях специального назначения", принятый 4 июля 1923 года в СССР, узаконивал сооружение в Советском Союзе (и в России), в частности, любительских радиостанций. 28 июля 1924 года в СССР было принято постановление "О частных приемных радиостанциях", которое разрешало гражданам СССР пользоваться индивидуальными радиоприемниками. Примерно в то же время было организовано Бюро содействия радиолюбительству и создано Общество радиолюбителей РСФСР. Сразу после своего создания эти две организации стали учредителями первого в СССР радиолюбительского журнала "Радиолюбитель", который издавался до 1930 года.

Начало развития фототелеграфии. Различие между фототелеграфией и телевидением. Первые успехи в передаче неподвижных изображений по линиям связи привлекли внимание ученых и изобретателей к проблеме телевидения. Важным шагом в деле практического решения проблемы телевидения явилось изобретение в 1884 г. П. Нипковым (Германия) простого оптико-механического устройства для построочной развертки и воспроизведения

телевизионных изображений. Открытие внешнего фотоэффекта, изобретение электронно-лучевой трубки, изобретение радио оказали решающее влияние на развитие телевидения. Заслуги Б. Л. Розинга в области электрической телескопии. В середине 20-х годов телевидение сделало свои первые практические шаги. Передающая телевизионная трубка, в которой оказалось возможным практически использовать эффект накопления электрических зарядов, была изобретена в 1931 г. в СССР С. И. Катаевым. Первые передачи телевизионных изображений по радио в СССР произведены 29 апреля и 2 мая 1931 г. . В 1938 г. в СССР были пущены в эксплуатацию первые опытные телевизионные центры в Москве и Ленинграде. Большой вклад в развитие телевидения внесли советские ученые и изобретатели - С. И. Катаев, П. В. Шмаков, П. В. Тимофеев, Г. В. Брауде, Л. А. Кубецкий А. А. Чернышев и др. Во второй половине 40-х годов разложение изображения передаваемого Московским и Ленинградским центрами было увеличено до 625 строк, что существенно повысило качество телевизионных передач. Бурный рост передающей и приемной телевизионной сети начался в середине 50-х годов. Если в 1953 г. работали только три телевизионных центра, то в 1960 уже действовали 100 мощных телевизионных станций и 170 ретрансляционных станций малой мощности, а к концу 1970 г.- до 300 мощных и около 1000. телевизионных станций малой мощности. Изобретение специальных электровакуумных приборов – магнетрона и клистрона, способных генерировать большие количества СВЧ - энергии. Недостатки триода как СВЧ - генератора. Реализация принципа объемного резонатора в магнетроне. Устройство и принцип работы клистрона. Классификация радиолокации. Способы обзора. Принцип действия. Импульсный метод радиолокации. РЛС непрерывного излучения. Дальность действия РЛС. Основные идеи и этапы развития.

Тема 7. Роль радио во второй мировой войне (4 часа)

Вопросы:

1. Развитие радиосвязи, появление радиорелейных линий.
2. Роль радиолокации на фронтах войны, на флоте и в авиации.
3. Работы по освоению дециметрового и сантиметрового диапазонов волн.
4. Разработка новых систем ближней, дальней и глобальной радионавигации.
5. Появление зачатков новых технологий – полупроводниковых приборов СВЧ (диодов), печатных схем (головки радиовзрывателей).

6. Разработка новых устройств СВЧ – ламп бегущей волны. Появление первых ЭВМ.

Методические рекомендации

Общие характеристики систем связи. История развития РРЛ. Принципы построения аппаратуры РРЛ. Характеристика радиорелейных систем передачи прямой видимости. Радиорелейные системы передачи прямой видимости. Тропосферные радиорелейные системы передачи.

Типы радиолокационных станций. Боевое применение радиолокации. Борьба с радиолокацией. Применение радиолокации в мирное время.

История исследования длинных и коротких волн. Распространение волн коротковолнового диапазона. Общие свойства радиоволн. Распространение поверхностных (земных) радиоволн. Распространение пространственных радиоволн. Распространение мириаметровых и километровых волн (сверхдлинных и длинных). Распространение гектометровых (средних) волн. Распространение декаметровых (коротких) волн. Распространение волн короче 10 м. (УКВ и СВЧ - волны).

Классификация и характеристики радионавигационных систем. Новые системы ближней, дальней и глобальной радионавигации. Система GPS и система Глонасс.

Вклад академика А.Ф. Иоффе в развитие физики полупроводников. Первый полупроводниковый прибор. Точечные выпрямители переменных токов СВЧ на основе кремния и германия, плоскостные германиевые диоды. Германиевый точечный триод (транзистор). Разработка новых устройств СВЧ – ламп бегущей волны. Появление первых ЭВМ.

Тема 8. Развитие радиотехники после войны (4 часа)

Вопросы:

1. Использование результатов военных разработок для создания новых систем радиосвязи (на рассеянии на следах метеоров, на тропосферном рассеянии, дальнейшее развитие радиорелейной связи).

2. Бурное развитие телевидения, сначала черно-белого, затем цветного.

3. Продвижение в области теории информации, теории сигналов. Работы Шеннона и Котельникова.

4. Осознание приближения к тупиковой ситуации в развитии электровакуумных усилительных ламп (особенно маломощных).

5. Изобретение транзистора в лабораториях Белл.
6. Начало освоения сложных сигналов в радиолокации, навигации и связи.

Методические рекомендации

Метеорная радиосвязь. Физический механизм. Использование связи. Создание новых систем радиосвязи на тропосферном рассеянии. Развитие радиорелейной связи.

Основы теории информации и теории сигналов. История открытия теоремы Котельникова-Шеннона. Развитие теории информации, теории сигналов. С именем В.А. Котельникова связано важнейшее сегодня направление в этих науках - цифровая обработка сигналов.

Первые полупроводниковые приборы. Германиевый точечный триод (транзистор), пригодный для усиления и генерирования электрических колебаний. Кремниевый точечный триод. Плоскостной высокочастотный тетрод. Полевой транзистор. Дрейфовый транзистор. Туннельные диоды, управляемые и неуправляемые четырёхслойные переключающие приборы, фотодиоды и фототранзисторы, варикапы, терморезисторы.

Теория сигналов и систем. Фильтрация и статистическая обработка. Классификация цифровых фильтров. Прием сигналов на фоне помех.

Тема 9. Последовательные революционные изменения элементной базы. Роль цифровых и компьютерных технологий в развитии радиоэлектроники (4 часа)

Вопросы:

1. Начало промышленного изготовления транзисторов в 50-х годах.
2. Разработка второго поколения ЭВМ.
3. Развитие космонавтики и создание первых спутниковых платформ для систем глобальной связи.
4. Бурное развитие малых ЭВМ на основе микропроцессоров.

Методические рекомендации

Начало промышленного изготовления транзисторов в 50-х годах и их широкого применения, сначала в низкочастотных цепях, затем в ВЧ и СВЧ цепях. Разработка второго поколения ЭВМ уже на транзисторах. Разработка первых интегральных микросхем в середине 60-х годов. Появление первых микропроцессоров.

Развитие космонавтики и создание первых спутниковых платформ для систем глобальной связи.

Бурное развитие малых ЭВМ на основе микропроцессоров. Непрерывное совершенствование технологии полупроводникового производства, обеспечивающее создание все более сложных и совершенных интегральных схем.

Все более расширяющийся процесс замены аналоговых устройств на цифровые, которые позволяют радикально улучшить качество работы радиоэлектронных устройств, сдерживаемый только относительно небольшим быстродействием цифровых схем. Широкое внедрение специализированных микропроцессоров для цифровой обработки радиосигналов, развитие цифровых систем связи. Переход на проектирование и конструирование радиоэлектронных устройств с помощью САПР, что ускоряет эти процессы, обеспечивает более высокое качество и удешевляет их.

1.3 ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ ИЛИ ДОКЛАДОВ

1. Важнейшие научные открытия Средневековья.
2. Важнейшие открытия в науке XVI-XVII вв.
3. Взаимосвязь науки, искусства и религии.
4. Влияние науки и техники на жизнь людей.
5. Классификации наук в истории.
6. Ключевые изобретения в истории человеческого общества.
7. Концепции науки в новое время.
8. Концепции происхождения науки.
9. Методологические основы истории науки и техники
10. Наука и религия.
11. Наука и философия.
12. Научные и ненаучные знания.
13. Научные революции и их роль в развитии науки.
14. Организация научных исследований в начале XX в.
15. Псевдонауки современности.
16. Средневековая наука Руси.
17. История телеграфа, телефона и радио
18. История развития идей и методов электродинамики
19. Этапы изменения элементной базы
20. Развитие телевидения
21. Развитие микроэлектронной техники
22. Основные материалы электронной техники
23. История развития радиолокации и радионавигации
24. Развитие цифровых систем связи
25. Цифровые и компьютерные технологии в радиоэлектронике
26. Роль А.С. Попова и Г. Маркони по созданию основных элементов линий радиосвязи

1.4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТА

1.4.1. Цели и задачи реферативной работы

Под реферативной работой подразумевается поиск информации и литературы избранной теме, ее глубокое осмысление и структурирование, оформленное в виде краткой письменной работы. Данный вид самостоятельной работы студента в основном нацелен на выработку навыков самостоятельной учебно-исследовательской работы: умения анализировать ту или иную проблему, вырабатывать критический подход к взглядам изучаемых авторов и формулировать собственные суждения. В качестве частных учебных задач, решаемых в ходе данного вида заданий, можно назвать овладение умениями поиска литературы (в том числе в виде электронных ресурсов Интернета), анализа и обобщения информации, грамотного составления плана исследовательской работы и ее внешнего оформления.

Для составления письменной работы можно использовать все доступные виды изданий учебного и научного характера: учебные пособия, учебники, хрестоматии, справочную и энциклопедическую литературу, монографии, научные статьи. В случае привлечения подобных публикаций из Интернета следует указать автора, название и полный адрес электронной страницы. В списке литературы в конце реферата должно быть указано не менее трех единиц литературы, которая использовалась при написании работы. Наличие в тексте примечаний и постраничных ссылок на цитируемых авторов не обязательно, но приветствуется, поскольку это свидетельствует о высокой академической культуре автора.

1.4.2. Требования к техническому оформлению и структуре

Рекомендуемый объем реферата – 12-15 страниц печатного (Word 14 шрифт, 1,5 интервала, формат А4) или рукописного текста. Реферат должен содержать следующие обязательные компоненты: титульный лист; план (содержание/оглавление); введение в начале текста и заключение с основными выводами в конце; текст основной части реферата должен быть обязательно разбит на главы (параграфы/разделы); в конце реферата должен прилагаться список литературы (не менее 3 наименований). На титульном листе должны быть представлены: название университета, кафедры, тема работы, ФИО и название группы студента, а также ФИО преподавателя.

Реферат должен быть написан грамотным русским языком с соблюдением стилистических норм. Наиболее важные части текста и названия разделов необходимо выделять подчеркиванием, жирным

шрифтом. В реферате могут быть представлены иллюстрации, вставленные в текст, или в качестве отдельного приложения к работе. Для составления письменной работы можно использовать все доступные виды изданий учебного и научного характера: учебные пособия, учебники, хрестоматии, справочную и энциклопедическую литературу, монографии, научные статьи. В случае привлечения подобных публикаций из Интернета следует указать автора, название и полный адрес электронной страницы. Наличие в тексте примечаний и постраничных ссылок на цитируемых авторов не обязательно, но приветствуется, поскольку это свидетельствует о высокой академической культуре автора.

Во введении обязательно должны присутствовать следующие пункты: постановка темы (предварительные общие сведения о вашей теме, краткая характеристика, а также, возможно, предварительное определение базовых категорий представленной проблематики) и цель работы; задачи реферата, которые необходимы для раскрытия цели, они будут подробно раскрыты в основной части (количество задач, как правило, соответствует количеству глав реферата); актуальность темы (значимость, важность рассматриваемого предмета для общества и культуры в прошлом и настоящем). Существует еще два компонента студенческого реферата, которыми можно усилить свою работу, хотя они не являются обязательными: указание на причину выбора темы, личное отношение к ней (персональная актуальность); краткий обзор существующей литературы по теме, показывающий степень ее исследованности (в качестве минимума можно дать характеристику той литературы, на основе которой написан реферат). Введение не должно быть большим, допускается объем в интервале 1-2 страниц. При этом обязателен полностью самостоятельный и хорошо осмысленный авторский текст этой части реферата. То же справедливо в отношении «заключения». Заключение – это итоговая часть работы, где самостоятельно подводятся основные выводы по представленному материалу. Заключение, как правило, состоит из следующих обязательных компонентов: самостоятельные выводы по содержанию каждой из глав реферата; общие выводы по всей работе, среди которых может быть выражено собственное оценочное мнение или критическое отношение по изученной проблематике.

1.4.3. Критерии оценки реферата

- самостоятельный характер работы;
- логически ясный и хорошо структурированный план, соответствующий сформулированной цели и поставленным задачам;
- содержание реферата отвечает требованиям объективности, научной корректности, грамотности, логичности, систематичности и аргументированности в изложении материала;

- соблюдение основных выше перечисленных технических требований, включающих в себя грамотное оформление титульного листа, списка литературы, соблюдение рекомендуемого объема и т.д.;
- успешная устная защита реферативной работы (по требованию преподавателя).

Раздел 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ РЭС

Международное сообщество пришло к пониманию необходимости ужесточить требования электромагнитной совместимости (ЭМС) и распространить регулирование в этой области на технические средства всех видов и назначений, подверженных воздействию электромагнитных помех и являющиеся их источниками. Необходимость этих изменений была вызвана тем, что во все отрасли экономики и разные сферы жизни общества возрастающими темпами стали внедряться микроэлектроника, оборудование информационных технологий и средства радиосвязи, обладающие повышенной восприимчивостью к электромагнитным помехам. Этот процесс обусловлен развитием научно-технического прогресса, причем нет оснований полагать, что в обозримом будущем такое положение дел может измениться.

Обеспечение электромагнитной совместимости, т.е. достижение такого состояния, когда электротехнические, электронные и радиоэлектронные аппараты, системы и установки будут пригодны к выполнению функций по назначению при воздействии помех, создаваемых электротехническими изделиями и вызываемых природными явлениями, стало необходимым условием научно-технического прогресса, а следовательно, и устойчивого развития экономики, общества и государства.

Любые электрические и электронные изделия, включая аппараты, системы и стационарные и подвижные установки, способные создавать электромагнитные помехи и (или) восприимчивые к их воздействию, должны быть изготовлены таким образом, чтобы:

– создаваемые ими электромагнитные помехи не превышали уровня, обеспечивающего функционирование радио-телекоммуникационного оборудования и других изделий в соответствии с их назначением;

– изделия имели достаточный уровень собственной устойчивости к электромагнитным помехам, обеспечивающий их функционирование в соответствии с назначением.

2.1. Проблема электромагнитной совместимости РЭС

2.1.1. Системный подход к проблеме электромагнитной совместимости

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) включает:

– прогнозирование непреднамеренных потенциально опасных электромагнитных связей между различными частями радиоэлектронных средств (РЭС);

– разработку на основе прогноза, теоретических и экспериментальных данных технических или организационных мероприятий, снижающих уровни этих опасных связей до приемлемых значений.

Обеспечение ЭМС является сложной комплексной задачей, требующей учета на возможно более ранней стадии создания РЭС. Это связано с тем, что взаимные непреднамеренные помехи могут определяться количеством и геометрией расположения излучающих и распределительных систем, спектральным составом передающих РЭС и уровнем восприимчивости приемных устройств, степенью экранирования аппаратуры и ее размещением, трассировкой сигнальных, управляющих и силовых линий, временным регламентом работы отдельных частей РЭС.

В процессе решения проблемы ЭМС выделяют три основные стадии.

Первая стадия – это решения, предпринимаемые на этапе проектирования РЭС. На этом этапе для заданной модели электромагнитной обстановки проблема ЭМС может быть решена достаточно точно и эффективно. Однако модель реально не может учесть все сопутствующие факторы, связанные с инженерной реализацией и технологией производства (например, совместимость со смежными радиоэлектронными системами, помехи от побочных частот и собственных гетеродинных трактов, т.е. внутрисистемную ЭМС, трудно прогнозируемые наводки смежного оборудования). Поэтому полное решение проблемы обеспечения ЭМС достигается на последних этапах разработки и конструирования, изготовления и испытаний.

Вторая стадия – проведение испытаний по критериям ЭМС и измерения параметров отдельных узлов РЭС и готового изделия.

Третья стадия – эксплуатация, где в результате тех или иных причин РЭС функционируют в условиях, отличающихся от расчетных.

Рассмотренные этапы тесно связаны между собой. Так, на стадии проектирования должны быть учтены особенности технологии и эксплуатации, в то же время на этапе эксплуатации возникает необходимость соответствующей коррекции параметров РЭС, производства контрольных измерений, привлечения методов обнаружения, разрешения сигналов и помех, что больше свойственно первым двум стадиям.

Требования по обеспечению ЭМС вступают, как правило, в противоречия с другими требованиями к комплексу – по использованию частот в РЭС, массогабаритными и стоимостными

характеристиками. Поэтому крайне важна конструктивная оптимизация этих требований, т.к. окончательное решение является компромиссным. На практике реализация этого положения затруднена из-за малого объема (особенно в начальной стадии проектирования РЭС) априорной информации об электромагнитной обстановке и недостаточного числа апробированных математических моделей, описывающих затухание электромагнитной энергии (ЭМЭ) в различных каналах на пути от источника к приемнику ЭМЭ.

Для решения этих вопросов необходимо знать:

- физические процессы, происходящие в источниках, и уровень генерируемых ими излучений в широком диапазоне частот;

- зависимость от частоты затухания электромагнитной энергии от источника к приемнику (пространственное затухание с учетом эффектов затенения и дифракции на элементах конструкции носителя или группировки РЭС, эффективность экранирования аппаратуры, затухание в селективных элементах, индуктивные и емкостные наводки, потери из-за рассогласования в трактах и т. п.);

- критерии количественной оценки вариации рабочих характеристик РЭС при воздействии непреднамеренных помех в зависимости от их спектрального состава (уменьшение потенциала за счет снижения чувствительности ПРМ (блокирование), снижение вероятности приема информации, увеличение частотных отстроек в системе связанных РЭС, возрастание уровня шумов на выходе ПРМ и т. п.);

- количественные характеристики возможных технических мер по увеличению развязок между источником и приемником в зависимости от частоты, а также возможные организационные мероприятия (оптимальное размещение аппаратуры; синтез антенн с низкими уровнями боковых лепестков (БЛ) диаграммы направленности (ДН); оптимизация формы импульса излучаемого сигнала, использование промежуточных устройств и поверхностей со специальными свойствами;

- оптимизация процедуры назначения частот и временное регламентирование работы РЭС;

- бланкирование приемника (ПРМ) в группе импульсных РЭС и т. п.).

Проблему прогнозирования ЭМС РЭС традиционно принято подразделять на две части:

- внутрисистемную ЭМС, для которой характерно близкое расположение РЭС, учет их взаимодействия в пределах одного РТК и анализ характеристик антенн в ближней и дальней зонах с учетом влияния конфигурации поверхности носителя или окружающих устройств;

– *межсистемную ЭМС*, для которой характерно электродинамическое взаимодействие антенн разных РТК в дальней зоне с учетом подстилающей поверхности и условий распространения радиосигналов через промежуточную среду.

Электродинамическая ситуация в случае внутрисистемной ЭМС отличается от межсистемной ЭМС тем, что взаимодействие антенн происходит, как правило, в ближнем поле, где еще не сформировались диаграммы направленности (ДН), а реальные коэффициенты усиления (КУ) отличаются от их значений в дальней зоне, где для учета межантенных развязок успешно используется метод геометрической теории дифракции (ГТД).

2.1.2. Алгоритмы назначения оптимальных частот РЭС

В ряде случаев оказывается невозможным реализовать необходимую развязку между антеннами РЭС с помощью одних только технических средств, и тогда для обеспечения ЭМС приходится прибегать к организационно-техническим мероприятиям – временному регламенту, оптимизации процедуры назначения частот и т.п. Необходимость в ней возникает, как правило, при размещении нескольких РЭС, особенно одного частотного диапазона, на объекте сравнительно малых размеров, в результате чего нормальное функционирование РЭС на некоторых частотах оказывается невозможным.

Таким образом, возникает задача выбора из допустимого множества N частот таких s частот (для приемных и передающих РЭС), при которых обеспечивается работоспособность РЭС в условиях существующих технических ограничений на используемые частоты.

В общем случае РЭС содержит несколько передатчиков и приемников и требуется выявить все потенциально опасные значения или комбинации частот передачи (зеркальные, квазизеркальные, реверсивные каналы приема, продукты активной интермодуляции), попадающих в каналы приема и оценить требования к нормам на величины развязок (степень пространственного, фильтрового и конструктивного подавления), их реализуемость по всем факторам воздействия помех.

На практике продукты нелинейного преобразования частот передатчиков генерируются не только активными, но и пассивными компонентами оборудования (так называемые продукты пассивной интермодуляции (ПИМ)). Эти помехи могут стать серьезным фактором нарушения ЭМС в РЭС. Типичные причины их появления – концентрация больших СВЧ-мощностей в общем антенно-фидерном тракте, используемом как на прием, так и на передачу; наличие неидеальных и разнородных переходов в фидере с большой проходящей мощностью; появление поверхностных

металлооксидных пленок (МОП) на облучателях и рефлекторах антенны, в СВЧ-фидерах. Продукты пассивной интермодуляции вызываются нелинейным преобразованием суммы спектральных составляющих большой мощности на несимметричных контактах или МОП-проводимостях диодного типа. Уровень ПИМ существенно зависит от состава и влажности атмосферы, состояния контактов.

Возможны случаи, когда уровень полезного сигнала для данного ПРМ, зависящий от характера радиолинии и расстояния между РЭС, становится сравнимым с уровнем собственных помех, помех от других РЭС или ими порождённых. Примером их могут служить характерные практически для всех подвижных носителей так называемые “контактные” помехи, физическая природа которых заключается в следующем.

Корпус подвижного носителя, на котором расположены антенны передающих РЭС, представляет собой, как правило, не сплошную металлическую конструкцию или поверхность, а собран (на заклепках) из отдельных частей, переходное сопротивление между которыми не во всех местах достаточно малое, особенно в процессе движения. По этой причине высокочастотные токи, индуцируемые на различных участках поверхности носителя при работе произвольного ПРД, могут создавать локальные разности потенциалов между контактирующими частями конструкции, что приводит к локальным микропробоям и тем самым к возникновению шумовых помех. Спектр подобных помех достаточно широкополосный. При мощностях ПРД, приблизительно равных 20...30 Вт, в метровом диапазоне длин волн экспериментально наблюдались уровни “контактных” помех 25...30 дБ/мкВ (в полосе ПРМ 100 кГц) на расстояниях 2...3 м от антенны ПРД, что заметно превышало уровень чувствительности большинства ПРМ. На расстояниях 15...20 м уровень шумовых помех снижался до 5...10 дБ/мкВ.

Одним из основных способов борьбы с контактными помехами является высококачественная устойчивая во времени металлизация (электростатический экран, экран для вихревых токов. Дополнительное снижение паразитного излучения было достигается путем экранирования генератора ПРД, что ослабляет помехи до 15 – 20дБ.

Среди общих рекомендуемых конструктивно-технологических мер по снижению уровней ПИМ можно выделить основные:

- применение покрытий проводящей поверхности СВЧ-фидеров, волноводных узлов;
- специальных волноводных фланцев для СВЧ-стыков с высоким контактным давлением;
- поддержание стабильной чистоты облучателя и рефлектора;

– использование особо чистых материалов, покрытий и технологии изготовления СВЧ-узлов (циркуляторов, переключателей, мостов сложения).

Для достижения наивысшего пространственного подавления помехи может возникнуть необходимость использования радиопоглощающих покрытий. Технология радиопоглощения и неотражающего экранирования эффективна для решения таких задач, как введение дополнительных устройств для пространственного затухания ЭМП между конфликтующими приборами; подавление поверхностных волн и переотражений при нежелательном распространении энергии в определенных направлениях; достижение требуемой радиогерметичности разъемов, кабельных переходов и волноводных стыков, подавление нежелательного антенного эффекта кабельных трасс, устранение непрогнозируемых эффектов перелива, затекания полей за апертуру антенны, оптимизация антенн по главному лепестку, подавлению заднего и бокового излучения, влияющие на пространственные развязки антенн, сглаживание градиентов напряженности поля в энергонапряженных зонах фидерных линий.

2.2. Пассивные и активные помехи

2.2.1. Классификация пассивных радиопомех

В зависимости от источника образования различают:

- непреднамеренные (естественные) пассивные помехи (ПП);
- преднамеренные (искусственные) ПП.

К ПП естественного происхождения относят мешающие отражения от земной поверхности, различных местных предметов, гидрометеоров (облаков, капель дождя, частиц снега), неоднородностей атмосферы, ионосферы.

Преднамеренные ПП – искусственно создаваемые помехи. По принципу действия преднамеренные пассивные помехи делятся на маскирующие и имитирующие.

Маскирующие пассивные помехи создаются с помощью следующих основных средств: дипольных отражателей; пассивных переизлучателей (угловых отражателей, линзовых отражателей, переотражающих антенных решеток); поглощающих противорадиолокационных покрытий, уменьшающих дальность действия РЛС за счет уменьшения ЭПО объектов; ложных целей, осуществляющих имитацию реальных целей и используемых против РЛС; радиолокационных ловушек осуществляющих перенацеливание систем управления оружием РЭС на себя и срыва наведения на истинную цель.

2.2.2. Классификация активных радиопомех

Для подавления РЛС могут использоваться как маскирующие, так и имитирующие активные помехи (рис. 2.1).

Маскирующие помехи представляют собой электромагнитные колебания, у которых хотя бы один параметр (амплитуда, частота, фаза, длительность или период следования импульсов) является случайной функцией времени.

Непрерывные шумовые помехи являются наиболее универсальными, так как обеспечивают принципиальную возможность маскировки полезных сигналов любой структуры и формы на временной и частотной оси, а также по направлению. Они могут использоваться для подавления РЭС различного назначения при разнообразных режимах их работы.

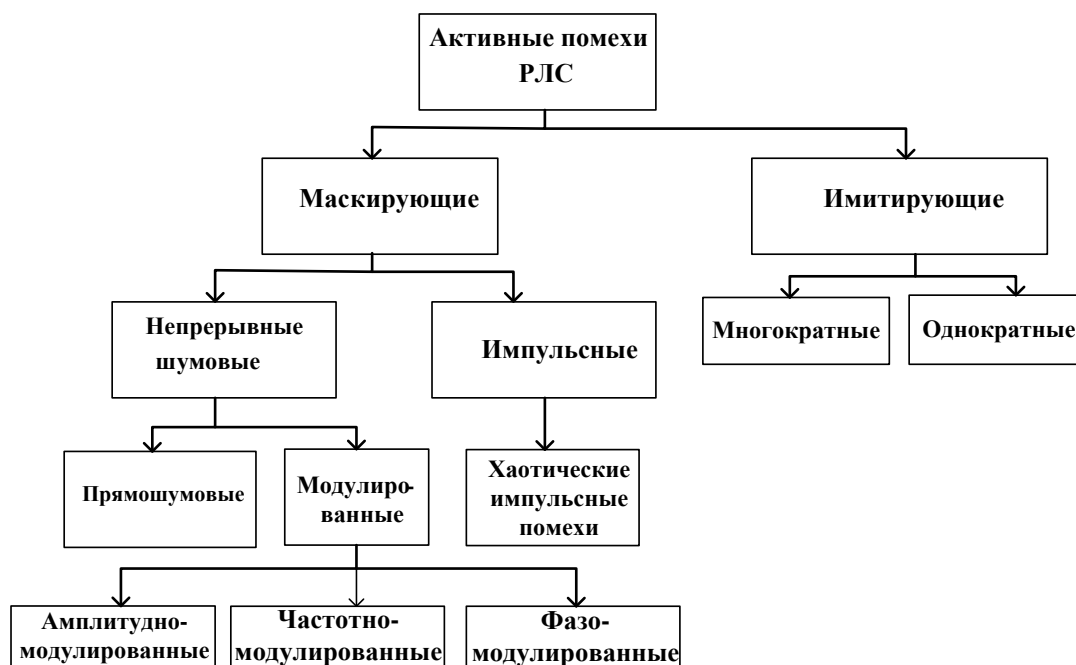


Рис. 2.2.1. Классификация активных радиопомех

В зависимости от способа формирования непрерывные шумовые помехи подразделяются на прямошумовые (немодулированные) и модулированные. Модулированные формируются путем модуляции высокочастотных гармонических колебаний низкочастотным шумом по амплитуде (АМ), частоте (ЧМ), фазе (ФМ) или одновременно по нескольким параметрам.

Хаотические импульсные помеховые сигналы (ХИП) представляет собой последовательность радиоимпульсов, параметры которых (U_m , $t_{и}$, $T_{п}$) изменяются во времени случайным образом.

Маскирующие активные помехи создают в приемном тракте РЭС мешающий фон (в дополнение к собственным шумам

приемника), который затрудняет или исключает возможность выделения полезного сигнала, т.е. вероятность правильного обнаружения уменьшается.

Имитирующие импульсные помехи обеспечивают создание на экране РЛС ложных отметок, не отличающихся от отметок реальных целей. Имитирующие импульсные помехи подразделяются на: многократные (МИП); однократные (ОИП). Имитирующие импульсные помехи формируются, как правило, путем ретрансляции с задержкой зондирующих сигналов РЛС. При однократном переизлучении образуется ОИП, а при переизлучении с различной задержкой образуется пачка МИП.

Выбор вида и параметров помехового сигнала определяются: особенностями функционирования подавляемого РЭС; структурой полезного сигнала; требуемым эффектом воздействия.

Основными условиями эффективности активных помех РЛС УВ являются: структурное; частотное; энергетическое; пространственное; временное.

Структурное условие. Для маскирующих шумовых помех их структура должна быть как можно ближе к структуре внутренних шумов приемника, т.е. к гауссовскому шуму (БГШ).

Частотное условие. Частотное условие заключается в том, что спектр помехи должен попадать в полосу пропускания подавляемого приемника.

Энергетическое условие. Отношение мощности маскирующей помехи к мощности сигнала на входе приемного устройства подавляемого РЭС в пределах полосы пропускания его линейной части должна быть больше или равно коэффициенту подавления.

Пространственное условие. Источник активных помех так должен быть расположен в пространстве относительно подавляемой РЛС и прикрываемых самолетов, чтобы самолеты находились в пределах зоны подавления. Зона подавления – это область воздушного пространства при нахождении в которой летательные аппараты не обнаруживаются радиолокатором.

Временное условие. Временное условие заключается в том, что маскирующая помеха обязательно должна присутствовать на входе приемника в момент приема полезного сигнала.

2.2.3. Характеристики пассивных помех

Дипольные отражатели

Дипольные отражатели (ДО) представляют собой тонкие пассивные вибраторы, изготовленные из металлизированной диэлектрической основы или алюминиевой фольги, резонансная частота которых близка к частоте подавляемых РЛС (рис. 2.2.2).

В качестве диэлектрической основы применяются бумага, стекловолокно, капрон. Для металлизации используются цинк, алюминий. Толщина металлизации составляет единицы – десятки мкм.

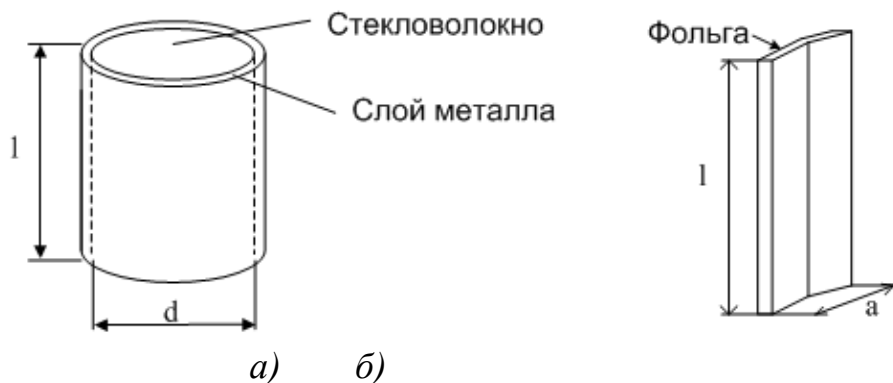


Рис. 2.2.2. Стекловолоконный (а) и фольговый (б) ДО

Размеры дипольных отражателей (длину, толщину) выбирают такими, чтобы обеспечить наиболее эффективное отражение радиоволн. Известно, что максимальную эффективную площадь отражения (ЭПО) имеют диполи с длиной, близкой к половине длины отражаемых радиоволн или кратной ей.

При увеличении длины дипольных отражателей их ЭПО изменяется волнообразно с максимумами на расстояниях, примерно равных $\lambda/2$, возрастая при последующих резонансах (рис. 2.2.3).

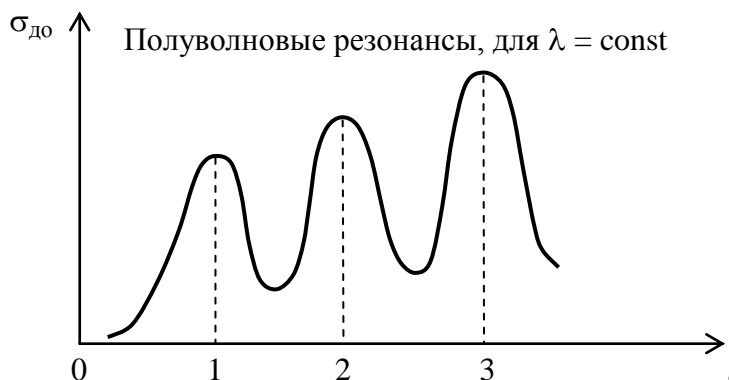


Рис. 2.2.3. Зависимость среднего значения ЭПО ДО от его длины

На практике чаще применяют полуволновые дипольные отражатели, т.к. увеличение длины диполя в целое число раз приводит к относительно небольшому увеличению ЭПО, но требует увеличение расхода материала на изготовление (выгоднее изготовить 2 полуволновых ДО вместо одного с длиной $l = \lambda$).

В диапазонах дециметровых и метровых волн иногда применяют ДО с $l \gg \lambda$ в виде длинных линий из фольги или нитей стекловолокна.

Дипольные отражатели с $l \approx \lambda/2$ называют настроенными, а с $l \gg \lambda/2$ – ненастроенными.

ЭПО ДО, произвольно ориентированного в пространстве относительно вектора электрического поля падающей электромагнитной волны \vec{E} (рис. 2.4, а), определяется выражением:

$$\sigma_{\text{до}} = 0.86 \lambda^2 \cos^2 \theta^0, \quad (2.2.1)$$

где θ^0 – угол между осью ДО и направлением вектора \vec{E} .

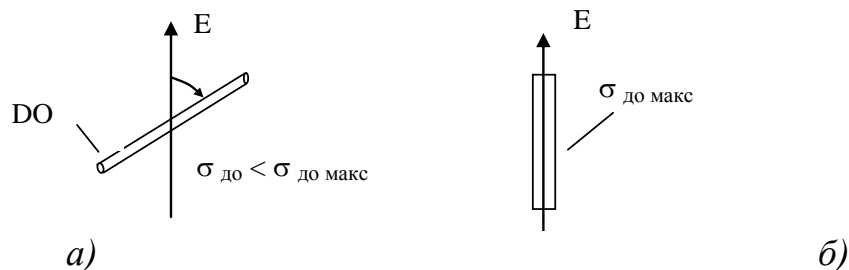


Рис. 2.2.4. Ориентация ДО в пространстве:

а) – произвольная, б) – соответствующая $\sigma_{\text{до макс}}$

При совпадении оси ДО с вектором \vec{E} (рис. 2.4, б) ЭПО будет максимальна и равна

$$\sigma_{\text{до макс}} = 0.86 \lambda^2. \quad (2.2.2)$$

Если ДО ориентирован перпендикулярно к вектору \vec{E} , то $\sigma_{\text{до}} = 0$.

Вследствие турбулентности атмосферы и аэродинамических свойств дипольные отражатели в облаке ориентируются произвольно. При этом можно считать, что случайная величина угла θ распределена с равномерной плотностью вероятности и среднее значение ЭПО ДО

$$\bar{\sigma}_{\text{до}} = \frac{1}{5} \sigma_{\text{до макс}} = 0,17 \lambda^2. \quad (2.2.3)$$

Пассивные переотражатели

Пассивные переотражатели применяются для увеличения ЭПО ложных целей ловушек, а также для маскировки и имитации наземных объектов при противодействии бортовым РЛС обзора земной поверхности.

Требования к пассивным переотражателям: большая ЭПО при малых размерах; широкая диаграмма переизлучения.

В качестве пассивных переотражателей широко применяются: уголковые отражатели; линзы Люнеберга; переизлучающие антенные решетки.

Уголковые отражатели

Реальная плоская металлическая пластина не является изотропным переизлучателем, а ее ЭПО $\sigma_{\text{пл}}$ оказывается больше ее геометрической площади S :

$$\sigma_{\text{пл}} = G_{\text{пл}} \cdot S, \quad (2.2.4)$$

где $G_{\text{пл}}$ – КПД пластины.

Так как $G_{\text{пл}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot S$, получаем

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S^2. \quad (2.2.5)$$

Например, при $S = 1 \text{ м}^2$, $\lambda = 3 \text{ см}$ $\sigma_{\text{пл}} \approx 13900 \text{ м}^2$.

Прямоугольные УО, секторные (круглые) УО (рис. 2.2.5).

Их максимальные ЭПО соответственно равны:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2}; \quad \sigma_{\Pi} = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2}; \quad \sigma_{\circ} = 2\pi \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (13)$$

где a – длина ребра отражателя.

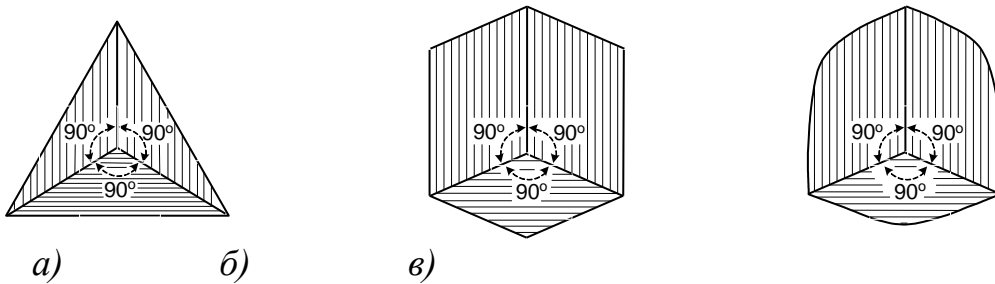


Рис. 2.2.5. Трехгранные УО:

а) – треугольный, б) – прямоугольный, в) – секторный

Линзовые отражатели

Одним из существенных недостатков УО является малая ширина диаграммы переизлучения. Более широкой диаграммой переизлучения обладают переизлучатели, выполненные на основе линзы Люнеберга.

Линза Люнеберга представляет собой шар из нескольких слоев диэлектрика, часть наружной поверхности которого металлизирована.

Диэлектрическая проницаемость ε и соответственно коэффициент преломления увеличивается с приближением к центру шара в соответствии с выражением

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (2.2.6)$$

где R – радиус шара; r – текущий радиус, т.е. расстояние от центра шара до рассматриваемой точки ($0 \leq r < R$).

На практике линза Люнеберга состоит из нескольких слоев диэлектрика с различной диэлектрической проницаемостью.

Из выражения для n (2.2.6), видно, что коэффициент преломления для наружной части шара близок к коэффициенту преломления воздушной среды ($n=1$) и $n = \sqrt{2}$ в центре шара.

В результате изменения коэффициента преломления траектории лучей в линзе искривляются (рис. 2.2.7). Пучок лучей, падающий на линзу, фокусируется в точку O (O') на рефлекторе и отражается в обратном направлении, параллельном падающим лучам.

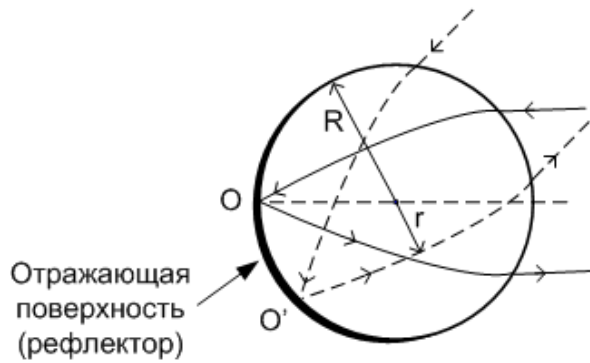


Рис. 2.2.7. Ход лучей в линзе Лунеберга
 Максимальная ЭПО линзы Лунеберга вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\text{л}} = 4\pi^3 \frac{R^4}{\lambda^2}. \quad (2.2.7)$$

Переизлучающие антенные решетки (ПАР)

ПАР относятся к перспективным пассивным переотражателям и обладают следующими достоинствами:

- обеспечивает переизлучение падающей волны в любом заданном направлении с любой поляризацией;
- обеспечивает возможность амплитудной, фазовой и поляризационной помеховой модуляции переизлучаемых сигналов;
- имеют более широкую диаграмму переизлучения;
- дают возможность изготовления с помощью техники печатных схем.

ПАР позволяют создавать помехи 2-х позиционным РЛС.

2.2.4. Характеристики активных помех

Прямошумовая помеха (ПШП)

Прямошумовая помеха (ПШП) – это случайный непериодический (флуктуирующий) сигнал. По своей структуре ПШП наиболее близка к собственным шумам приемника и, следовательно, обладает наилучшими маскирующими свойствами, т.е. коэффициент качества ПШП $\eta_{\text{п}} \approx 1$ и защититься от нее практически невозможно.

ПШП в основном характеризуется двумя характеристиками – плотностью вероятности мгновенных значений помехи $p(u_{\text{п}})$ и спектральной плотностью мощности помех $S_{\text{п}}(f)$.

Если при формировании ПШП не происходит ограничения напряжения помехи, то одномерная плотность вероятности распределена по гауссовскому закону (рис. 2.2.8)

$$p(u_{\text{п}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left\{-\frac{(u_{\text{п}} - m_u)^2}{2\sigma_u^2}\right\}, \quad (2.2.8)$$

где m_u – математическое ожидание, т.е. среднее значение напряжения помехи; σ_u^2 – дисперсия, характеризует мощность помехи на сопротивлении $R = 1$ Ом; σ_u – среднеквадратическое отклонение мгновенных значений напряжения помехи $u_{\text{п}}(t)$ относительно m_u . Чем больше, тем больше «амплитуда» флуктуаций напряжения помехи.

Спектральная плотность мощности ПШП $S_{\text{п}}(f)$ в идеальном случае можно считать равномерной в пределах ширины спектра помехи $\Delta F_{\text{п}}$ (рис. 2.2.9).

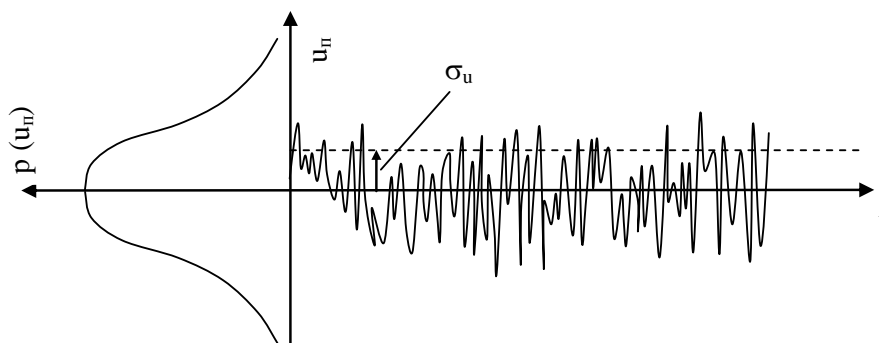


Рис. 2.2.8. Плотность распределения вероятностей ПШП

Мощность ПШП на входе подавляемого приемника в пределах его полосы пропускания $\Delta f_{\text{пр}}$ в этом случае определяется выражением

$$P_{\text{п. вх}} = S_{\text{п}}(f) \cdot \Delta f_{\text{пр}}. \quad (2.2.8)$$

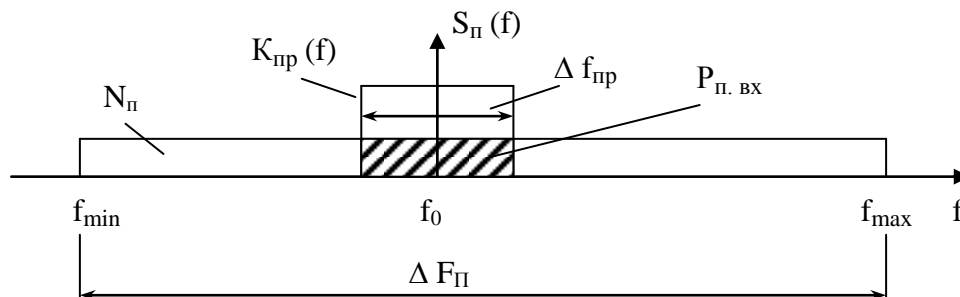


Рис. 2.2.9. Спектральная плотность мощности ПШП

Таким образом, отличие ПШП от БГШ заключается в том, что ПШП имеет ограниченную ширину спектра $\Delta F_{\text{п}}$, но если $\Delta F_{\text{п}} \geq \Delta f_{\text{пр}}$ и спектральная мощность практически равномерна в пределах полосы пропускания, то по своим маскирующим свойствам ПШП эквивалентна БГШ и имеет коэффициент качества $\eta_{\text{п}} = 1$. На практике получить ПШП с $\eta_{\text{п}} = 1$ не удастся. Это связано с тем, что в любом реальном усилительном тракте имеют место ограничения колебаний напряжения уровнем. Такое ограничение приводит к изменению закона распределения мгновенных значений ПШП и спектра помехи, в результате чего качество помехи $\eta_{\text{п}}$ ухудшается (рис. 2.2.10).

Если $\sigma_{\text{увх}} \gg U_{\text{огр}}$, то ПШП превращается в импульсы с приблизительно постоянной амплитудой и меняющимся по случайному закону длительностями $\tau_{\text{и}}$. Помеха такого типа будет обладать плохими маскирующими свойствами ($\eta_{\text{п}} < 1$).

При $\sigma_{\text{увх}} \ll U_{\text{огр}}$ ограничений практически не будет ($\eta_{\text{п}} \approx 1$), но при этом усилитель будет работать с низким КПД.

При $\sigma_{\text{увх}} \approx U_{\text{огр}}$ обеспечивается высокий КПД при незначительном ухудшении качества помехи.

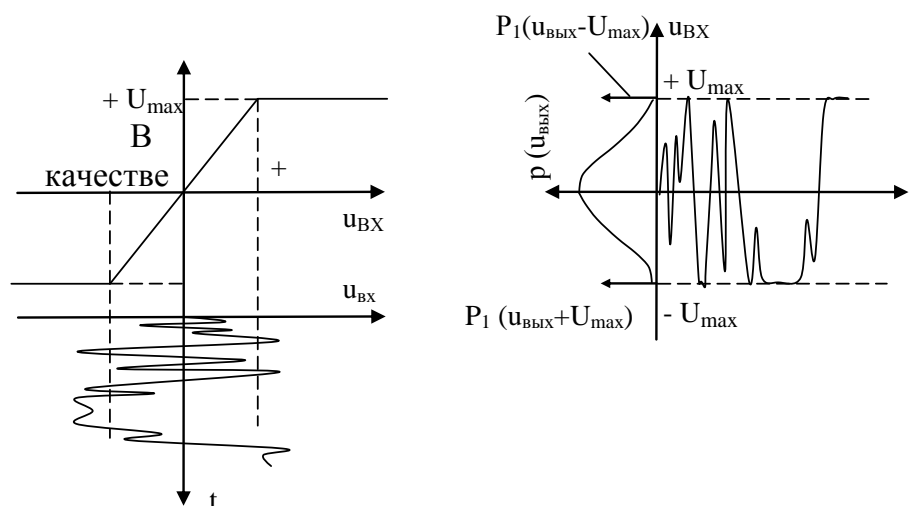


Рис. 2.2.10. Амплитудное ограничение ПШП

Амплитудно-модулированная шумовая помеха

Для области СВЧ создание прямошумовой помехи затруднительно, поэтому применяют АМШ, ЧМШ, ФМШ помехи.

Амплитудно-модулированная шумовая помеха (АМШП) представляет собой гармоническое колебание, модулированное по амплитуде шумом:

$$u_{\text{п}}(t) = U_{\text{мп}} [1 + k_{\text{ам}} u_{\text{мод}}(t)] \cos \omega_0 t, \quad (2.2.9)$$

где $U_{\text{мп}}$ – амплитуда несущего колебания; $k_{\text{ам}}$ – крутизна модуляционной характеристики амплитудного модулятора; $u_{\text{мод}}(t)$ – модулирующее шумовое напряжение; ω_0 – несущая частота.

Частотно-модулированная шумовая помеха

Частотно-модулированная шумовая помеха (ЧМШП) представляет собой высокочастотное колебание с постоянной амплитудой, мгновенное значение частоты которого изменяется по закону изменения модулирующего шума, т.е.

$$\omega_{\text{п}}(t) = \omega_0 + K_{\text{чм}} \cdot u_{\text{ш}}(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t), \quad (2.2.10)$$

где $K_{\text{чм}}$ – крутизна модуляционной характеристики; $\Delta\omega(t)$ – случайное отклонение мгновенной частоты относительно частоты несущего

колебания ω_0 . Схема формирования ЧМШ помехи приведена на рис. 2.2.11.

Имитирующие помехи

Помехи этой группы создают на экране РЛС ложные отметки, не отличающиеся от отметок реальных целей. В результате обеспечивается дезориентация оператора и перегрузка системы обработки информации, хотя не исключается возможность обнаружения прикрываемых целей.

Имитирующие помехи подразделяются на однократные (ОИП) и многократные (МИП).

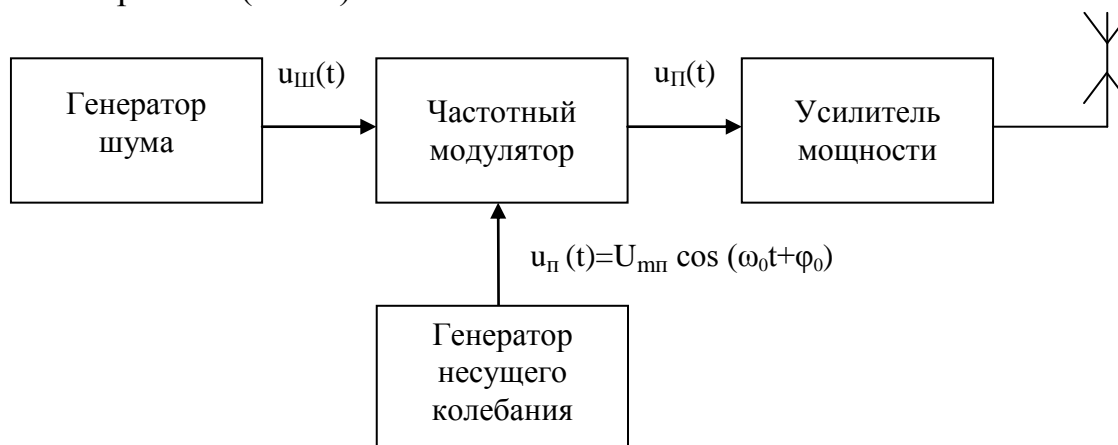


Рис. 2.2.11. Схема формирования ЧМШ помехи

МИП представляет собой серию радиоимпульсов, излучаемых в ответ на принятый сигнал $u_c(t)$ подавляемой РЛС (рис. 2.2.12 а, б), которые по форме, длительности и амплитуде должны соответствовать полезным сигналам. Период следования серий помеховых импульсов $T_{п}$ должен быть одинаковым с периодом повторения $T_{и}$ импульсов РЛС, иначе можно использовать для борьбы с МИП различные схемы селекции. На индикаторе кругового обзора РЛС МИП имитирует боевой порядок ложных целей рядом с целью.

В зависимости от времени задержки $\tau_{зад}$ помеховых импульсов относительно принятого импульса РЛС МИП может быть:

- запаздывающей ($\tau_{зад} \ll T_{и}$);
- упреждающей ($\tau_{зад} \approx T_{и}$).

Импульсы упреждающей МИП, генерируемые в ответ на очередной импульс РЛС с задержкой $\tau_{зад}$, близкой к $T_{и}$, становятся упреждающими для следующего очередного импульса РЛС.

Задержка помеховых импульсов $\tau_{зад}$ может быть постоянной или плавно меняться для имитации движущейся цели (относительно истинной).

ОИП является частным случаем МИП.

Структурная схема станции помех, обеспечивающей формирование МИП, имеет вид представленный на рис. 2.2.13.

Сигналы РЛС, принятые приемной антенной, усиливаются в УРЧ и поступают в устройство запоминания несущей частоты (УЗЧ) и на амплитудный детектор (АД). В УЗЧ формируется в ответ на принятый сигнал непрерывное колебание с частотой, близкой к частоте РЛС. Продетектированный в АД сигнал запускает генератор пачки модулирующих импульсов, который с заданной задержкой выдает серию импульсов, которые используются для модуляции колебаний УЗЧ.

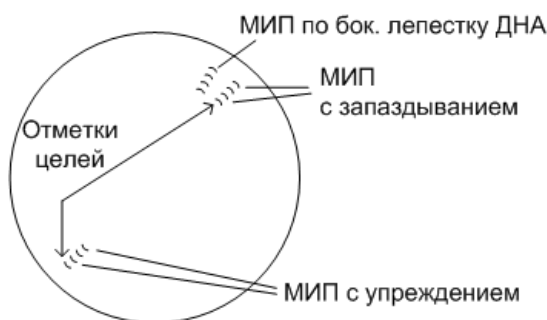
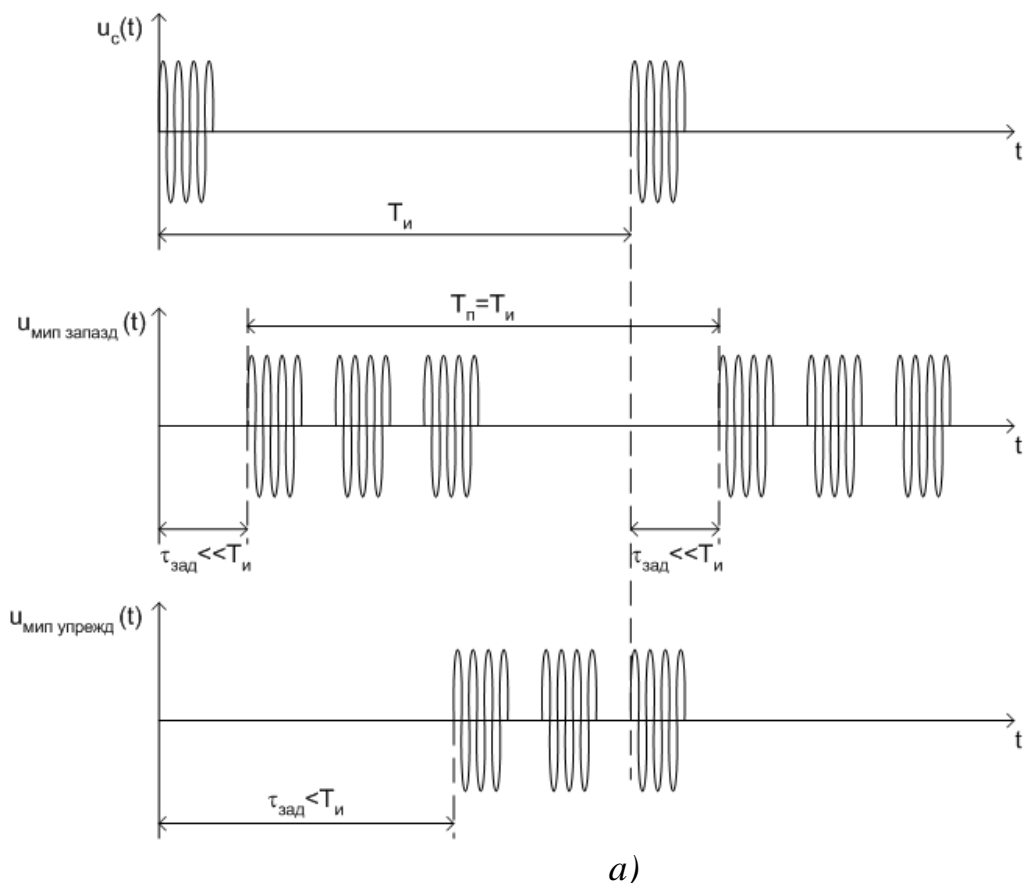


Рис. 2.2.12. Временная диаграмма МИП (а) и вид экрана индикатора РЛС при воздействии имитирующих помех (б)

Хаотические импульсные помехи

Хаотические импульсные помехи (ХИП) представляет собой последовательность радиоимпульсов с частотой заполнения, близкой

к несущей частоте сигналов РЛС, а амплитуда, длительность и интервалы между соседними импульсами изменяются по случайному закону.

На практике по случайному закону могут изменяться не все перечисленные параметры, а один или два (например, F_{Π} и τ_{Π}).

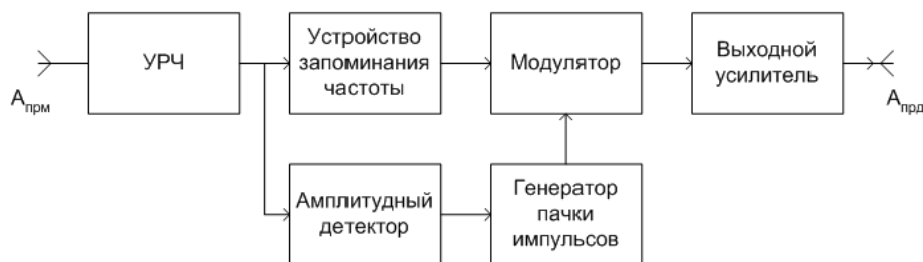


Рис. 2.2.13. Структурная схема передатчика МИП

Принцип формирования ХИП поясняется рис. 2.2.14.

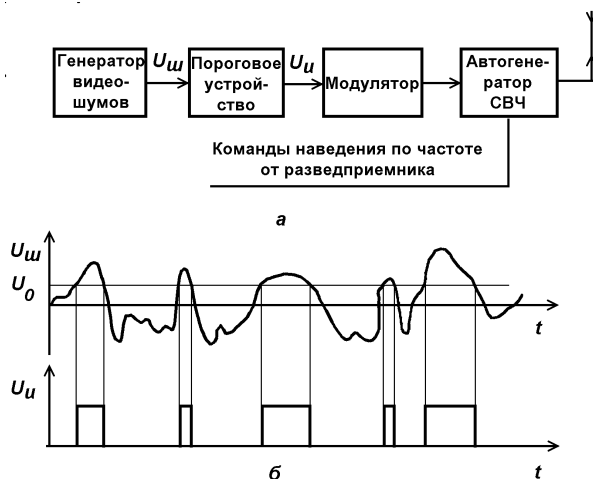


Рис. 2.2.14. Структурная схема передатчика ХИП (а) и временные диаграммы поясняющие принцип формирования ХИП (б)

2.3. Методы борьбы с организованными помехами

2.3.1. Общая характеристика методов борьбы с организованными радиопомехами

Воздействие помех на РЭС приводит к снижению дальности и вероятности обнаружения целей, увеличению ошибок при наведении оружия, затруднение обмена информацией.

Под помехозащищенностью РЭС понимают способность эффективно работать в условиях ведения противником РЭП. Она зависит как от скрытности работы РЭС, так и от его помехоустойчивости, т.е. способности РЭС функционировать с заданным качеством в условиях действия на него помех.

Наиболее общим качественным показателем помехозащищенности может выступить вероятность выполнения РЭС своих задач в условиях ведения противником РЭП

$$P_{\text{зад}}^{\text{РЭП}} = P_{\text{д.п.}} P_{\text{зад}}^{\text{П}} + (1 - P_{\text{д.п.}}) P_{\text{зад}}^{\text{О}}, \quad (2.3.1)$$

где $P_{\text{д.п.}}$ – вероятность действия преднамеренных помех (характеризует скрытность РЭС при ведении противником РТР); $P_{\text{зад}}^{\text{П}}$ – вероятность успешной работы РЭС при условии воздействия на него помех; $P_{\text{зад}}^{\text{О}}$ – вероятность успешной работы РЭС в условиях, когда преднамеренные помехи ему не создаются.

Наряду с общими показателями помехозащищенности и помехоустойчивости могут применяться частные критерии:

- отношение эффективных мощностей сигналов и помех на выходах линейных частей радиоприемников;
- вероятности ложной тревоги и пропуска цели;
- вероятность ошибки при передаче дискретных сообщений;
- вероятность срыва сопровождения и др.

2.3.2. Организационные методы борьбы с помехами

Они заключаются в выборе целесообразных способов боевого применения и размещения РЭС. К ним относят:

1. Комплексное применение РЭС различных диапазонов волн на объектах узлов связи, радиолокационных узлах (например, комплексирование радиолокационного и инфракрасного (ИК) каналов наблюдения за воздушными целями);

2. Получение информации о воздушной обстановке от РЛС, которые в рассматриваемый момент времени не подвержены помехам;

3. Смена рабочих частот (одновременная работа на нескольких частотах, вынуждает переводить передатчики помех в заградительный режим работы);

4. Маневр местоположением РЭС;

3. Применение специальных режимов работы РЭС (использование средств помехозащиты, изменение характеристик излучаемого сигнала); создание широкоразветвленных сетей связи, организация крытых и дублирующих радиосетей, использование ретрансляторов, подготовка расчетов РЭС (экипажей) к работе в условиях помех;

4. Уничтожение и поиск забрасываемых ПрД помех;

5. Создание ложного радиолокационного поля с целью отвлечения сил и средств РЭБ;

6. Использование систем активного ответа.

7. Обучение операторов РЛС работе в условиях помех.

2.3.3 Технические способы и средства защиты от помех

Проблема защиты РЭС от организованных всегда актуальна, так как связана с взаимно обусловленным развитием средств и способов РЭП и РЭЗ. Современные радиоэлектронные средства разрабатываются так, чтобы обеспечить их нормальное функционирование в условиях непрерывно действующих помех. Создание таких средств – весьма сложная задача. Однако сейчас она довольно успешно решается, чему в значительной мере способствуют имеющиеся успехи в области теории и практики оптимальных методов передачи и приема радиосигналов.

Принципиально технические методы защиты от радиопомех основаны на различиях структур помеховых и полезных сигналов и их параметров (несущей частоты, амплитуды, фазы, спектра, длительности, частоты повторения импульсов, направлений их прихода, поляризации и т.д.).

Наиболее эффективная защита обеспечивается в устройствах адаптивного типа, которые автоматически выбирают средства и методы защиты.

Защита от помех обеспечивается с помощью использования следующих технических методов:

1. Повышения отношения сигнал/шум, что достигается: увеличением энергетического потенциала полезного сигнала; накоплением принимаемых полезных сигналов; сжатием полезных сигналов.

2. Предотвращения перегрузки приемных устройств с помощью: схем регулировки усиления (АРУ, ШАРУ, ВАРУ, МАРУ); логарифмических усилителей.

3. Селекции (выделения) сигналов, среди которых различают: пространственную; поляризационную; частотную по f_H и F_d ; СДЦ; временную; амплитудную; комбинированную.

4. Помехоустойчивого кодирования.

5. Оптимальной обработки сигналов.

2.3.4. Методы обеспечения необходимого соотношения мощностей сигнала и помехи

На вход приемного устройства РЛС поступает смесь полезного сигнала и шума. В простейшем случае входную реализацию можно представить в виде

$$y(t) = u_c(t) + n(t), \quad (2.3.2)$$

где $u_c(t)$ – полезный сигнал; $n(t)$ – белый шум.

Отраженный от цели полезный сигнал $u_c(t)$ можно представить в виде

$$u_c(t) = \operatorname{Re}\{S(t)\exp(j\omega_o t)\}, \quad (2.3.3)$$

где $S(t)$ – комплексная огибающая сигнала, состоящая из произведения двух комплексных огибающих: U_m – зондирующего сигнала и M_d – мультипликативной помехи, вызванной в основном доплеровскими флуктуациями отраженного сигнала.

Для импульсного радиосигнала прямоугольной формы энергию можно определить по выражению

$$E_{c1} = P_{и} \tau_{и} = \frac{U_m^2}{2} \tau_{и}, \quad (2.3.4)$$

где $\tau_{и}$ – длительность импульса.

Полная энергия пачки из n импульсов равна

$$E = E_{c1} n, \quad (2.3.5)$$

где n – количество накапливаемых импульсов.

Тогда отношение сигнал/шум по мощности на выходе любого линейного согласованного приемника будет равно

$$q = \frac{2E}{N_o} = \frac{2nE_{c1}}{N_o}, \quad (2.3.6)$$

а по напряжению

$$q = \sqrt{\frac{2E}{N_o}} = \sqrt{\frac{2nE_{c1}}{N_o}}. \quad (2.3.7)$$

Известно, что возможность обнаружения детерминированного сигнала при оптимальном приеме с заданными вероятностями правильного обнаружения

$$P_{обн} = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{2E/N_o}} - \sqrt{\frac{2E}{N_o}}\right) \quad (2.3.8)$$

и ложной тревоги

$$P_{лт} = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{2E/N_o}}\right) \quad (2.3.9)$$

не зависит от формы сигнала и определяется только отношением энергии сигнала к спектральной интенсивности шума, т.е. пиковым отношением сигнал/шум на выходе корреляционного приемника или согласованного фильтра (2.3.7). В формулах (2.3.8) и (2.3.9) h – значение оптимального порога.

По выражению (2.3.8) можно рассчитать кривые обнаружения сигнала (рис.2.3.1). Исходя из анализа (2.3.8) и рис. 2.3.1 можно сделать вывод, что с увеличением q увеличивается $P_{обн}$ при фиксированной $P_{лт}$.

Способы увеличения отношения сигнал/шум (помеха) q

1.Повышения энергетического потенциала РЛС

$$P_{\text{ивх}} = \frac{P_{\text{и}} G_{\text{с}}}{4\pi D_{\text{с}}^4} A_{\text{эф}} \sigma_{\text{ц}} \quad (2.3.10)$$

и количества накапливаемых сигналов n.

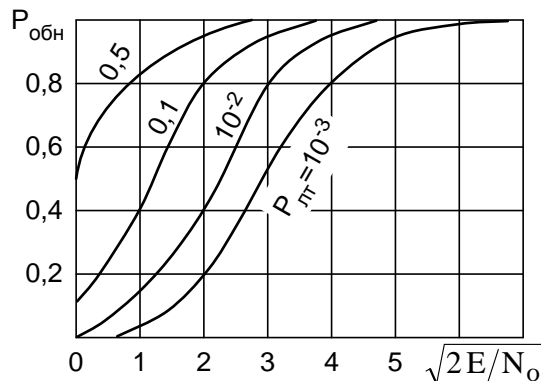


Рис. 2.3.1. Кривые обнаружения детерминированного сигнала

Анализ выражения (2.3.10):

– увеличение уровня мощности излучаемых сигналов $P_{\text{и}}$ возможно до определенного предела. Ограничение $P_{\text{и}}$ вызвано ограничением возможностей и габаритов передающих устройств;

– увеличение КНД антенн $G_{\text{с}}$ возможно за счет применения узких ДНА (например ФАР), однако ограничивается габаритами антенных систем;

– увеличение количества накапливаемых сигналов n замедляет обзор пространства. Ограничением на количество накапливаемых сигналов являются недопустимые информационные потери;

– увеличение длительности зондируемых сигналов $\tau_{\text{и}}$ приводит к ухудшению разрешающей способности РЛС по дальности.

В условиях воздействия помех всовременных РЛС предусматривается возможность: уменьшения скорости вращения РЛС; увеличения мощности излучаемых сигналов $P_{\text{и}}$ в 2 раза; увеличения длительности импульсов $\tau_{\text{и}}$ в 2 – 4 раза.

2. Применение сжатия импульсов

$E = P_{\text{ивх}} \tau_{\text{и}} B$, где B – база сигнала ($B = K_{\text{сж}}$).

В современных РЛС база сигнала B может достигать порядка 20 – 500. Ограничение: трудность технической реализации дисперсионных линий задержки с большим $K_{\text{сж}}$.

2.3.5. Защита приемных устройств от перегрузок

Радиоприемники, предназначенные для приема импульсных и амплитудно-модулированных (АМ) сигналов, при действии

радиопомех большой интенсивности могут перегружаться. При перегрузке приемник не реагирует на изменение амплитуды входного сигнала и, следовательно, теряет возможность воспроизводить передаваемое сообщение. Перегрузка наступает из-за того, что режим работы электронных усилительных приборов становится резко нелинейным, близким к коммутаторному: они периодически переходят от насыщения к отсечке. Это приводит к падению дифференциального коэффициента передачи, который может стать даже отрицательным.

Перегрузка возможна в любой части приемника: усилителе высокой частоты (УВЧ), усилителе промежуточной частоты (УПЧ), амплитудном детекторе или видеоусилителе (ВУ). Однако прежде всего перегружается последний каскад УПЧ.

Каждый приемник АМ или импульсных колебаний рассчитывается так, чтобы в ожидаемом динамическом диапазоне интенсивности входных сигналов перегрузка не наступала. Достигается это с помощью систем автоматической регулировки усиления (АРУ) и логарифмических усилителей.

Логарифмические усилители

Логарифмические усилители (ЛУ) сигналов промежуточной частоты обладают весьма широким динамическим диапазоном. Начиная с некоторого (минимального) напряжения на входе, амплитуда выходного напряжения приблизительно пропорциональна логарифму относительного изменения интенсивности входного сигнала.

Выходное напряжение ЛУ может быть записано в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} K_0 U_{\text{ВХ}}, & U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{ВХ}0} \\ A \log_a \left[\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}0}} \right] + B, & U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ}0} \end{cases}, \quad (2.3.11)$$

где $U_{\text{ВХ}0}$ – напряжение, соответствующее переходу от линейного участка к логарифмическому. A , B – постоянные коэффициенты. Основание логарифма a выбирается из условий требуемых характеристик усилителя.

Зависимости амплитуды выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ и коэффициента усиления $K_{\text{ЛУ}}$ от отношения $\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}0}}$ показаны на рис.

2.3.2.

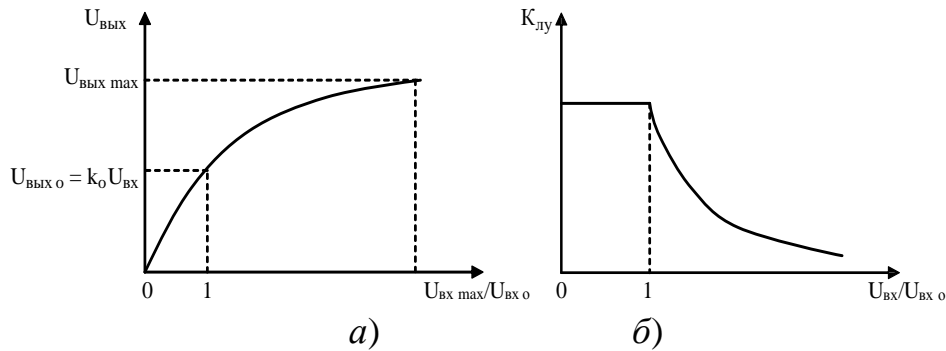


Рис. 2.3.2. Зависимости амплитуды выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ (а) и коэффициента усиления $K_{\text{ЛУ}}$ (б) от отношения $U_{\text{ВХ max}}/U_{\text{ВХ 0}}$

Коэффициенты А и В выбирают из условия, что переход от линейного участка к логарифмическому осуществляется без скачка производной, т.е. в точке перехода производная логарифмического участка совпадает с коэффициентом передачи $K_0 = U_{\text{ВЫХ 0}}/U_{\text{ВХ 0}}$ линейного участка. Исходя из этих условий коэффициенты А и В выбирают равными:

$$A = \frac{1}{\log_a e} K_0 U_{\text{ВХ 0}}, \quad B = U_{\text{ВЫХ 0}} = K_0 U_{\text{ВХ 0}}. \quad (2.3.12)$$

Выбор точки перехода на логарифмический участок обычно производится так, чтобы $U_{\text{ВХ 0}}$ лежала ниже уровня собственных шумов на величину порядка 20 дБ. Поэтому практически весь диапазон входных сигналов приходится на логарифмический участок, чем обеспечивается большой динамический диапазон.

Коэффициент передачи ЛУ для любого основания логарифмов выражается формулой

$$K_{\text{ЛУ}} = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = K_0 U_{\text{ВХ 0}} \frac{1}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ 0}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (2.2.13)$$

и убывает обратно пропорционально амплитуде входного сигнала (рис. 2.3.2 б).

Динамическим диапазоном ЛУ по выходу называют величину

$$D_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ max}}}{U_{\text{ВХ 0}}} \quad \text{или} \quad D_{\text{ВЫХ}} [\text{дБ}] = 20 \lg D_{\text{ВЫХ}}. \quad (2.3.14)$$

В выражении (2.3.14) $U_{\text{ВЫХ max}}$ – максимальная величина выходного сигнала, при котором реальная амплитудная характеристика остается близкой к логарифмической.

Динамический диапазон по входу

$$D_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ max}}}{U_{\text{ВХ 0}}} \quad \text{или} \quad D_{\text{ВХ}} [\text{дБ}] = 20 \lg D_{\text{ВХ}}. \quad (2.3.15)$$

Ясно, что

$$D_{\text{ВЫХ}} = b \log_a e D_{\text{ВХ}}, \quad (2.3.16)$$

где $b = \ln a = 1/\log_a e$, e – основание натуральных логарифмов.

Для получения большого динамического диапазона по входу стремятся выбирать логарифмы с малым основанием. Обычно требуемый динамический диапазон по входу (100 дБ и выше) можно реализовать, используя ЛУ, состоящее из нескольких каскадов.

При действии помехи в ЛУ происходит подавление помехой сигнала. При большом уровне помехи на входе $U_{п\text{вх}}$ напряжение помехи на выходе ЛУ равно

$$U_{п\text{вых}} \approx U_0 b \log_a e \frac{U_{п\text{вх}}}{U_{\text{вх}0}}, \quad (2.3.17)$$

где $U_0 = K_0 U_{\text{вх}0}$.

В то же время амплитуда сигнала (приращение амплитуды выходного напряжения, обусловленное действием сигнала)

$$U_{с\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} = K_{\text{лу}} U_{\text{мс}} = \frac{U_{п\text{вх}}}{U_{\text{вх}0}} U_{\text{мс}}. \quad (2.3.18)$$

Следовательно, отношение помеха/сигнал на выходе

$$\frac{U_{п\text{вых}}}{U_{с\text{вых}}} = \frac{U_{п\text{вх}}}{U_{\text{мс}}} b \log_a e \frac{U_{п\text{вх}}}{U_{\text{вх}0}}. \quad (2.3.19)$$

Поскольку $U_{п\text{вх}} \gg U_{\text{вх}0}$, отношение помеха/сигнал на выходе всегда больше, чем на входе и увеличивается с ростом помехи. Физически это объясняется тем, что коэффициент передачи по сигналу определяется помехой на входе и убывает с ростом уровня помехи.

Имеется несколько способов реализации логарифмических усилителей. Наибольшее распространение нашел метод последовательного детектирования с последующим суммированием. ЛУ такого типа бывают с последовательно и параллельно включенными усилителями. Функциональная схема ЛУ с последовательным включением каскадов для импульсных сигналов изображена на рис. 2.3.3. В схему входит n одинаковых усилительных каскадов 1, 2, ..., n , столько же ограничителей $\text{Огр}_1, \text{Огр}_2, \dots, \text{Огр}_n$ (с одинаковыми уровнями ограничения) и детекторов D_1, D_2, \dots, D_n . Выходы детекторов $D_1 - D_{n-1}$ соединены с устройствами временной задержки ($\text{УВЗ}_1 - \text{УВЗ}_{n-1}$ соответственно), предназначенными для компенсации временных запаздываний при прохождении импульсов в усилительных каскадах. Каждый усилитель, ограничитель, детектор и устройство временной задержки образует своеобразную ячейку. Выходное напряжение формируется в результате суммирования напряжений, снимаемых с каждой из этих ячеек. Оно равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n U_{\text{ВЫХ}i}, \quad (2.3.20)$$

где $U_{\text{ВЫХ}i}$ – напряжение на выходе i -й ячейки.

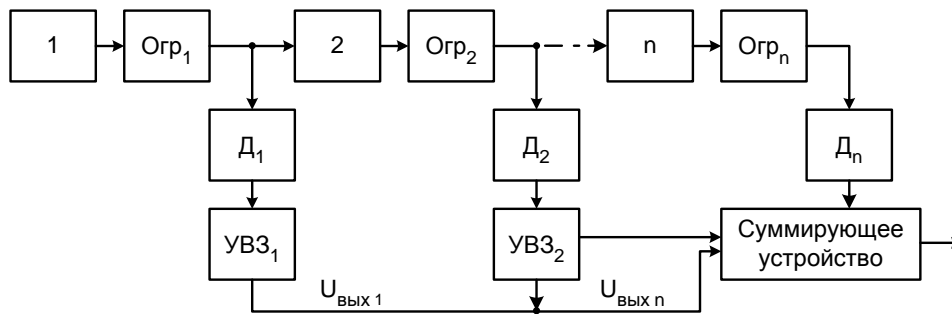


Рис. 2.3.3. Функциональная схема ЛУ с последовательным включением каскадов

Характер зависимости $U_{\text{ВЫХ}}$ от $U_{\text{ВХ}}$ (амплитудная характеристика ЛУ) представлен на рис. 2.3.4. Эта зависимость имеет вид ломанной, состоящей из отдельных участков, каждый из которых соответствует определенному числу ячеек, где достигнут уровень ограничения.

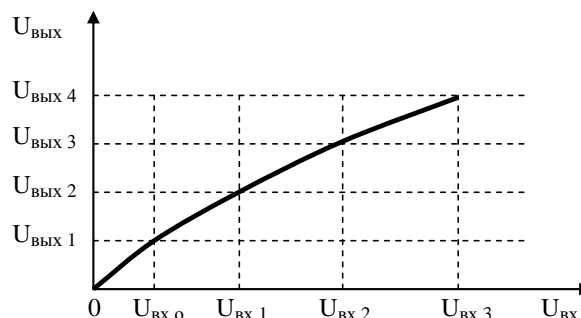


Рис. 2.3.4. Формирование АХ ЛУ с последовательно включенными усилителями

Системы АРУ

Автоматическая регулировка усиления предназначена для поддержания уровня выходного сигнала приемного устройства или усилителя вблизи некоторого номинального значения при изменении уровня входного сигнала. Автоматическое выполнение этой функции необходимо потому, что изменения уровня входного сигнала могут происходить хаотически и достаточно быстро, вследствие воздействия шумов и помех, изменения расстояния между источником излучения (переизлучения) и приемным устройством и т.д. Ручная регулировка усиления может использоваться лишь для установки уровня выходного сигнала, который должен поддерживаться системой АРУ.

В радиосвязи напряжение сигнала на входе приемника может изменяться в 10^3 раз, а в радиолокации – 10^5 раз (соответственно на 60 и 100 дБ). Выходное напряжение приемника при этом не должно изменяться более чем в 1,2 – 3 раза (на 1,6 – 9,6 дБ). Это требование диктуется как допустимыми искажениями информационной составляющей сигнала в тракте приемного устройства, так и *отсутствием перегрузок его каскадов*, способных привести к длительным потерям чувствительности. При этом сама система АРУ не должна вызывать чрезмерных искажений огибающей сигнала или приводить к появлению паразитной амплитудной модуляции сигнала, т.е. система АРУ должна быть устойчивой.

Системы АРУ могут быть *обратными* и *прямыми*. Обратные системы АРУ являются системами с обратной связью – в них точка съема напряжения для формирования регулирующего воздействия расположена дальше от входа приемника, чем точка приложения регулирующего воздействия. Иначе говоря, это системы с регулировкой «назад». В прямых системах АРУ точка съема напряжения для запуска схемы АРУ расположена ближе к входу приемника, чем точка приложения регулирующего воздействия. Эти системы не образуют петли обратной связи и являются системами с регулировкой «вперед». Каждая из этих систем обладает достоинствами и недостатками. В настоящее время в военных системах большее распространение получили обратные системы АРУ, так как эти системы защищают от перегрузок все каскады приемника, расположенные дальше от входа, чем точка приложения регулирующего воздействия, а сами цепи АРУ находятся под воздействием сигнала со сжатым динамическим диапазоном и также не подвержены перегрузкам. Функциональная схема обратной системы АРУ приведена на рис. 2.3.5.

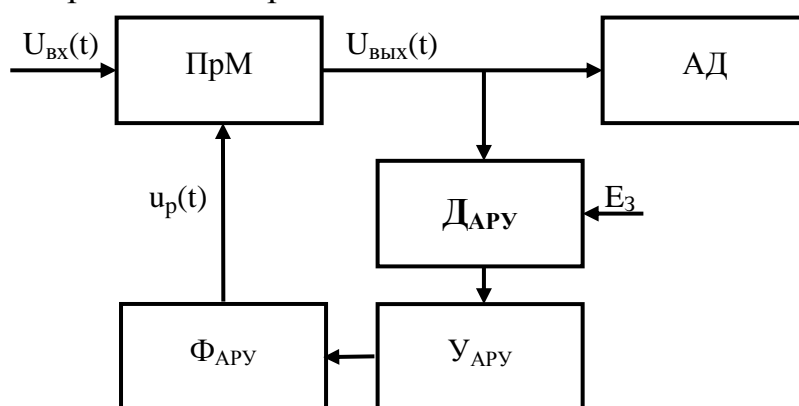


Рис. 2.3.5. Функциональная схема обратной системы АРУ

Напряжение с выхода линейной части радиоприемника (ПрМ) поступает на детектор АРУ ($D_{\text{АРУ}}$). Далее следует усилитель ($U_{\text{АРУ}}$) и фильтр ($\Phi_{\text{АРУ}}$). Выходное напряжение $u_p(t)$ с выхода фильтра

поступает на регулируемые каскады для изменения коэффициента усиления $K(u_p)$ приемника.

Обычно нет необходимости снижать усиление слабых сигналов $U_{ВХ} \leq U_{ВХ\text{мин}}$, не создающих перегрузок приемника. Для придания цепям АРУ пороговых свойств, т.е. включения их только при определенной амплитуде сигнала, цепи АРУ запирают принудительным смещением и отпирают только после того, как напряжение сигнала превысит напряжение запираения. Обычно напряжение запираения («задержки») подается на детекторы или усилители АРУ. На рис. 2.3.5 это напряжение E_3 подается на детектор АРУ. Подобные системы АРУ называются *задержанными*. Задержка может быть введена по среднему значению сигнала или по максимуму. В схеме, представленной на рис. 2.3.5, используется задержка по максимуму сигнала. Если постоянная времени нагрузочной цепи $D_{АРУ}$ меньше периода повторения импульсов (при импульсном сигнале) и диод $D_{АРУ}$ заперт напряжением задержки E_3 , то при $U_{ВЫХ} < E_3$ система АРУ будет разомкнута. При $U_{ВЫХ} > E_3$ диод $D_{АРУ}$ отпирается каждым импульсом, удовлетворяющим этому условию, и после фильтрации в фильтре $\Phi_{АРУ}$ вырабатывается регулирующее напряжение u_p , пропорциональное амплитуде максимального импульса. Это система АРУ по максимуму сигнала, которая стремится поддерживать постоянным максимальное значение выходного напряжения.

Примерный вид регулировочной характеристики изображен на рис. 2.3.6. Поскольку динамический диапазон $G_p = 10^3 - 10^5$, график регулировочной характеристики строят обычно в полулогарифмической системе координат.

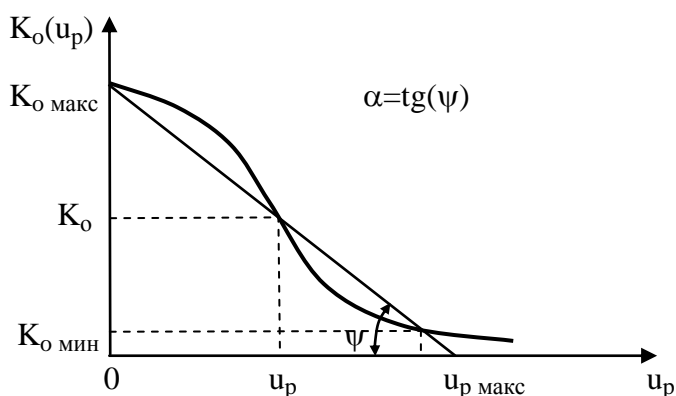


Рис. 2.3.6. Зависимость $K_0(u_p)$ от u_p

В обратных системах АРУ при подаче напряжения u_p на каскады УПЧ число регулируемых каскадов обычно колеблется в пределах 2–5. Сами регулируемые каскады должны располагаться возможно ближе к входу приемника как с точки зрения лучшей защиты от перегрузок, так и по соображениям уменьшения нелинейных искажений (коэффициент нелинейных искажений в УВЧ

и УПЧ пропорционален U_o^2 , где U_o – амплитуда сигнала на входе каскада). Зная значение $K_{o \text{ макс}}$, можно найти

$$K_{o \text{ мин}} = \frac{K_{o \text{ макс}}}{G_p}, \quad (2.3.21)$$

а по значению $K_{o \text{ мин}}$ определить $u_{p \text{ макс}}$ на регулировочной характеристике рис. 2.3.6.

Это значение $u_{p \text{ макс}}$ должна обеспечить система АРУ при подаче на ее вход максимального сигнала в точке съема напряжения для запуска системы АРУ. Если принять, что на вход системы АРУ подается выходное напряжение с выхода УПЧ приемника (рис. 2.3.5), то цепь АРУ будет обладать амплитудной характеристикой $u_p(u_{\text{ВЫХ}})$. Примерный вид таких характеристик для задержанной системы АРУ изображен на рис. 2.3.7. В задержанной системе АРУ регулирующее напряжение появляется только при $U_{\text{ВЫХ}} \geq E_3$. При очень большом напряжении $U_{\text{ВЫХ}}$ цепь АРУ может перегружаться, что приводит к загибу характеристики.

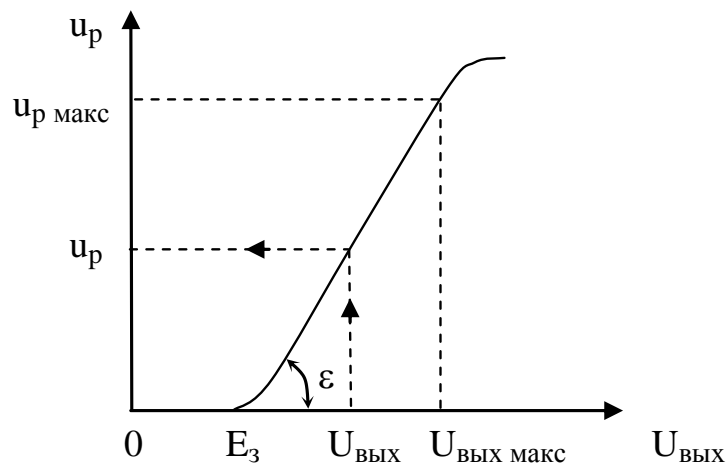


Рис. 2.3.7. Амплитудная характеристика системы АРУ

Тангенс угла наклона амплитудной характеристики определяет коэффициент усиления цепи АРУ – $K_{\text{АРУ}}$. Считая эту характеристику прямой, можно записать:

$$K_{\text{АРУ}} = \text{tg } \varepsilon = \frac{u_{p \text{ макс}}}{U_{\text{ВЫХ макс}} - U_{\text{ВЫХ мин}}} = \frac{u_{p \text{ макс}}}{U_{\text{ВЫХ мин}}} \cdot \frac{1}{\beta - 1}, \quad (2.3.22)$$

где $\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ макс}}}{U_{\text{ВЫХ мин}}}$.

Снижать усиление при $U_{\text{ВЫХ}} \leq U_{\text{ВЫХ мин}}$ нерационально, поэтому имеет смысл брать $E_3 = U_{\text{ВЫХ мин}}$, т.е. включать систему АРУ после того, как выходное напряжение достигнет номинального

значения и может быть использовано при допустимых искажениях. Тогда, с учетом равенства $U_{\text{ВЫХ МИН}} = E_3$, из (2.3.22) получим:

$$E_3 = \frac{u_{p\text{ макс}}}{K_{\text{АРУ}} \cdot (\beta - 1)}. \quad (2.3.23)$$

Из уравнений (2.3.22) и (2.3.23) следует, что невозможно получить «идеальную» обратную систему АРУ, для которой $\beta = 1$. Это потребовало бы бесконечно большого усиления или в цепи АРУ, или в тракте прохождения сигнала, поскольку при $E_3 \rightarrow \infty$ $U_{\text{ВЫХ МИН}} \rightarrow \infty$ при конечном значении $U_{\text{ВХ}}$.

$$\text{Чем больше } K_{\text{АРУ}}, \text{ тем ближе } \beta \text{ к единице } \beta = \frac{u_{p\text{ макс}}}{K_{\text{АРУ}} U_{\text{ВЫХ МИН}}} + 1.$$

При изменениях амплитуды входного сигнала амплитуда выходного напряжения также изменяется. Система АРУ, находясь под воздействием выходного напряжения (обратная система АРУ), изменяет коэффициент усиления тракта с некоторым запаздыванием, обусловленным наличием инерционных звеньев. Это приводит к искажениям огибающей входного сигнала, вызываемым цепью АРУ. Однако результирующие искажения сигнала при наличии АРУ оказываются значительно меньшими, чем при ее отсутствии, так как амплитудная модуляция (огибающая сигнала) может быть значительно искажена за счет перегрузки приемного тракта.

При анализе переходных процессов в приемнике, имеющем цепь АРУ, обычно полагают, что инерционные звенья содержатся только в цепи АРУ, а сам тракт прохождения сигнала безынерционен и управляется регулирующим напряжением АРУ.

Пусть регулируемая часть тракта характеризуется начальным усилением $K_{o\text{ нач}} = K_{o\text{ макс}}$ и регулировочной характеристикой $K_o(u_p)$ (рис. 2.3.6) и, кроме того, содержит нерегулируемую часть с коэффициентом усиления $K_{o\text{ нр}}$. Тогда в любой момент времени амплитуда выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ определяется приближенным соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}}(t) K_{o\text{ нр}} (K_{o\text{ макс}} - K_o(u_p)). \quad (2.3.24)$$

где $K_o(u_p)$ – коэффициент усиления приемника, зависящий от напряжения регулировки u_p .

Уравнение (2.3.24) описывает тракт прохождения сигнала.

Напряжение u_p находится из соотношения

$$u_p = (U_{\text{ВЫХ}} - E_3) \cdot K_{\text{АРУ}} \cdot F(p), \quad (2.3.25)$$

справедливого при $U_{\text{ВЫХ}} \geq E_3$. Здесь $F(p)$ – передаточная функция фильтра системы АРУ, а $K_{\text{АРУ}}$ – коэффициент передачи детектора и усилителя АРУ.

Выражение (2.3.25) справедливо при условии, что усилитель промежуточной частоты имеет такую широкую полосу пропускания, а напряжение регулирования благодаря фильтру меняется так медленно, что переходные процессы в приемнике, обусловленные действием напряжения u_p , можно не учитывать. Это положение хорошо выполняется на практике.

Уравнения (2.3.24) и (2.3.25) являются нелинейными, и система этих уравнений может быть решена лишь для некоторых частных случаев. Часто $K(u_p)$ аппроксимируют линейной зависимостью (рис. 2.3.6).

Полная аналоговая модель системы АРУ на основании выражений (2.3.24) и (2.3.25) приведена на рис. 2.3.8. Она составлена по методу информационного параметра, которым в данном случае является амплитуда напряжения сигнала. Здесь ФП – функциональный преобразователь, описывающий регулировочную характеристику регулируемой части приемника.

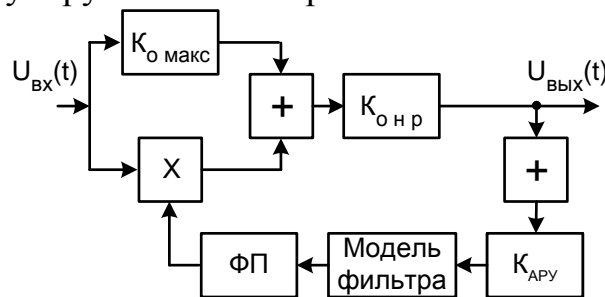


Рис. 2.3.8. Аналоговая модель системы АРУ

На рис. 2.3.9. представлен случай воздействия импульсной помехи на систему с АРУ. $K_о(u_p)$ переменный, для мощного сигнала он мал, для сигнала малой мощности он велик. За счет использования АРУ динамический диапазон приемника значительно расширяется.

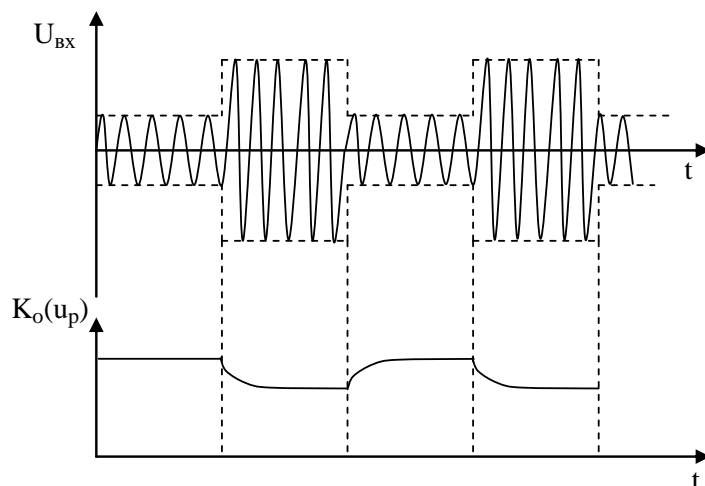


Рис. 2.3.9. Графики поясняющие воздействие ИП на приемник с АРУ

В обзорных радиолокационных станциях уровень внешних шумов может сильно изменяться в зависимости от направления антенны РЛС. Для выравнивания уровня выходных шумов в приемниках используются «АРУ по шумам», или «шумовые АРУ» (ШАРУ). При этом регулирующее напряжение вырабатывается благодаря детектированию шумов в детекторе ШАРУ. Быстродействие системы должно быть согласовано с темпом обзора так, чтобы система ШАРУ успевала обрабатывать изменение уровня шумового фона.

В последнее время для управления РЛС и обработки радиолокационной информации широко применяют ЦВМ. Их можно использовать и для создания цифровой АРУ (ЦАРУ). Она имеет ряд преимуществ перед обычными аналоговыми системами: независимость длительности процесса установления требуемого усиления от уровня входного сигнала; независимость регулировочных характеристик от разбросов и конкретных свойств цепи АРУ и регулируемого усилителя (при полностью цифровом исполнении); возможность установления требуемого усиления после приема первого импульса от сопровождаемой цели; астатизм и сохранение установленного усиления при перерывах в приеме сигнала.

Построение обратной системы ЦАРУ иллюстрируется функциональной схемой рис. 2.3.10.

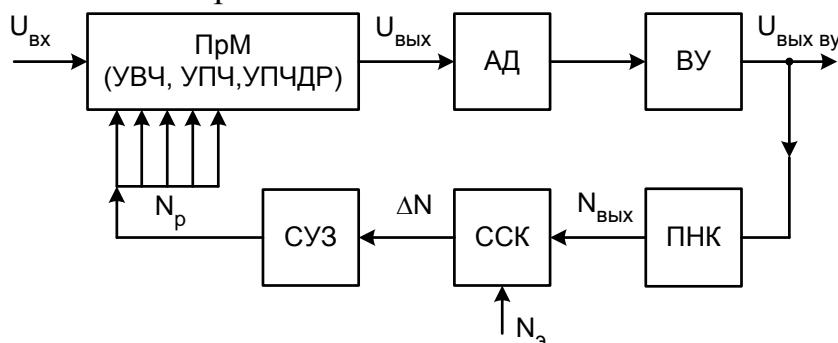


Рис. 2.3.10. Функциональная схема обратной системы ЦАРУ

Выходное напряжение видеосуилителя преобразуется в двоичный код в преобразователе напряжение-код (ПНК). Код выходного напряжения $N_{вых}$ сравнивается с эталонным кодом $N_э$ в схеме сравнения кодов (ССК), в результате чего образуется код рассогласования ΔN . Заметим, что ССК – не что иное, как цифровое пороговое устройство, а эталонный код – цифровой аналог напряжения задержки. В результате поразрядного усреднения в схеме усреднения и запоминания (СУЗ) вырабатывается код регулирования. Код регулирования управляет регулируемыми элементами с дискретной двоичной регулировкой. Число таких элементов равно числу разрядов кода регулирования, и в зависимости от наличия в данном разряде N_p нуля или единицы соответствующий элемент регулирования имеет

минимальный или максимальный коэффициент передачи. В схеме рис. 10. полагается, что этими регулируемыми элементами являются каскады УПЧ с дискретной регулировкой (УПЧДР). Перепад коэффициента передачи элемента, соответствующего данному разряду, сопряжен со старшинством разряда. Приведем пример.

Пусть число регулируемых элементов $n = 6$ и соответственно код регулирования – шестизначный. Максимальное значение шестизначного двоичного кода $N_{p \text{ макс}} = 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2 + 1 = 63$

($N_p = a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_{n-i} 2^{n-i} + a_1 2^1 + a_0 2^0$, где $a_i = 0$ или 1). Пусть общий динамический диапазон регулировки усиления $D_p =$

126 дБ. Тогда цена младшего разряда $m = \frac{G_p}{N_{p \text{ макс}}} = \frac{126}{63} = 2$ дБ. Для i -

го регулируемого элемента перепад усиления $G_{pi} = m 2^{n-i}$ дБ. Таким образом, регулируемые элементы должны давать следующие перепады усиления (табл. 2.3.1).

Таблица 2.3.1

i	1	2	3	4	5	6	Итого
G_{pi} , дБ	64	32	16	8	4	2	126

Цена младшего разряда определяет достижимую точность регулирования при идеальной работе всех прочих элементов схемы. В принципе можно иметь сколь угодно высокую точность работы ЦАРУ, так как цифровая схема запоминания N_p является идеальным интегратором и обеспечивает системе свойство астатизма.

Рассмотрим коротко особенности амплитудных характеристик регулируемого усилителя при действии АРУ (рис. 2.3.11). Если система АРУ отсутствует (кривая 1), то, начиная с некоторого значения $U_{\text{вых. п}}$, появляется перегрузка усилителя и его способность передавать приращения напряжения $U_{\text{вх}}$ теряется. При этом амплитудная модуляция входного напряжения (огibaющая) искажается или устраняется совсем.

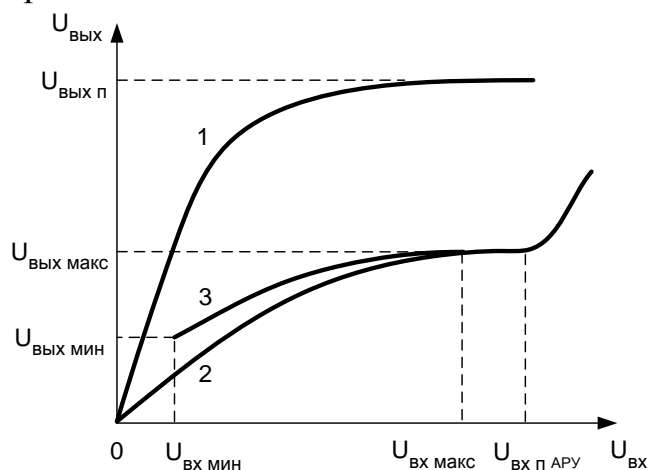


Рис. 2.3.11. Амплитудные характеристики различных систем АРУ

При наличии незадержанной системы АРУ (кривая 2) коэффициент усиления начинает уменьшаться с появлением напряжения $U_{вх}$, однако искривление амплитудной характеристики еще не свидетельствует об искажении АМ-сигнала (оггибающая сигнала), если система АРУ инерционна. Изображенные на рис. 11 амплитудные характеристики являются статическими и сняты при медленном изменении напряжения $U_{вх}$, т.е. при замкнутой системе АРУ. Инерционная система АРУ не замыкается для составляющих полезной модуляции и поэтому, защищая усилитель от перегрузки, способствует неискаженному воспроизведению этой полезной модуляции сигнала на выходе. При наличии задержанной (или усиленно-задержанной) системы АРУ (кривая 3) коэффициент усиления слабых сигналов ($U_{вх} \leq U_{вх\text{мин}}$) не снижается и амплитудные характеристики усилителя без АРУ и с АРУ совпадают при условии $U_{вх} < U_{вх\text{мин}}$. Начиная с некоторого значения $U_{вх\text{п АРУ}}$, сама цепь АРУ начинает перегружаться и ее стабилизирующее действие ослабляется.

2.3.6. Повышение помехоустойчивости РЭС методами пространственной селекции

Пространственная селекция обеспечивается антенной. Чем уже ее ДНА и меньший уровень БЛ, тем выше пространственная селекция. Эта селекция дает возможность вести борьбу с многоточечными помехами, т.е. помехами, создаваемыми несколькими разнесенными в пространстве источниками. Однако неизбежное наличие боковых лепестков не позволяет полностью избавиться от влияния таких помех.

Реализация узких основных лепестков ДНА и получение низкого уровня боковых лепестков ДНА РЭС осуществляется с помощью выбора распределения амплитуды и фазы электромагнитного поля (ЭМП) в раскрыве антенны и с помощью применения антенн с нелинейной обработкой сигналов.

Выбор амплитудного и фазового распределения ЭМП по раскрыву антенны

В синфазных антенных системах (АС) улучшение их пространственной избирательности достигается выбором амплитудного и фазового распределения ЭМП в раскрыве антенны. Для того чтобы исключить неоднозначность измерения угловых координат источников излучений, необходимо уменьшать уровень боковых лепестков ДНА. При заданных размерах АС это обеспечивается выбором амплитудного распределения, плавно спадающего к краям раскрыва. Однако такое амплитудное распределение ЭМП в раскрыве АС вызывает увеличение ширины

основного лепестка ДНА. В теории систем доказывается, что может быть создана оптимальная АС, ДН которой при заданной ширине главного лепестка будет иметь минимальный уровень БЛ. Такая ДН описывается полиномом Чербышева.

Антенны с нелинейной обработкой сигналов

Существует большое разнообразие АС с нелинейной обработкой сигналов. Результирующий выходной сигнал такой АС получается при нелинейных операциях над сигналами, формируемыми элементарными антеннами.

Нелинейная обработка сигнала позволяет синтезировать любую ДН, которая может быть получена выбором амплитудно-фазового распределения ЭМП в раскрыве обычной линейной решетки.

Амплитудный метод компенсации радиопомех действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны

Сущность амплитудного метода компенсации показана на рис. 2.3.12. Основной приемник содержит антенну A_0 , смеситель $См_0$, усилитель промежуточной частоты УПЧ₀ и амплитудный детектор D_0 . В состав компенсационного приемника входят аналогичные элементы, обозначенные на рис. 2.3.12 соответствующими символами с индексом «к». Кроме того, имеется местный гетеродин (Г) и вычитающее устройство (ВУ).

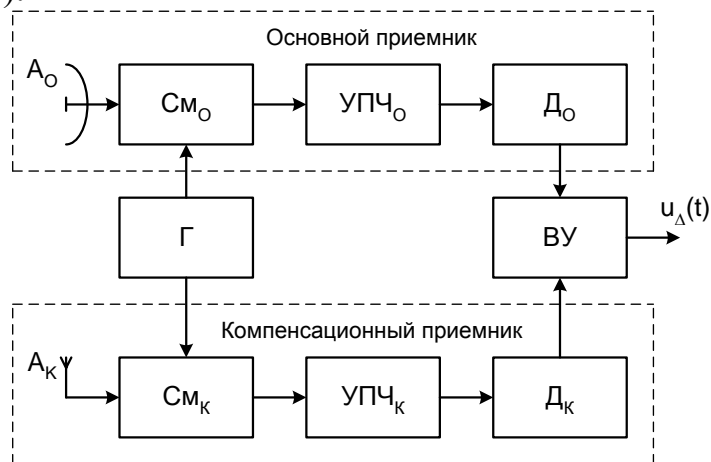


Рис. 2.3.12. Упрощенная функциональная схема амплитудного компенсатора помех

Компенсация помех достигается в вычитающем устройстве при условии, что помеховые сигналы, вырабатываемые детекторами D_0 и D_k , начинают действовать в одно и то же время и имеют одинаковые длительности и огибающие. Чтобы эти условия выполнялись, требуется полная идентичность одноименных элементов в основном и компенсационном приемниках, а антенны A_0 и A_k должны иметь диаграммы направленности $F_0(\theta)$ и $F_k(\theta)$, удовлетворяющие равенствам:

$$F_k(\theta) = 0 \quad \text{при} \quad -0,5 \theta_0 < \theta < 0,5 \theta_0,$$

$$F_k(\theta) = F_0(\theta) \quad \text{при } \theta > 0,5\theta_0 < -0,5\theta_0.$$

Здесь θ — угол, отсчитываемый от направления максимума диаграммы направленности приемной антенны A_0 , а θ_0 — ширина главного лепестка диаграммы направленности той же антенны. Диаграммы направленности основной антенны $F_0(\theta)$ (сплошная кривая) и идеализированной компенсационной антенны $F_k(\theta)$ (штрихпунктирная кривая) показаны на рис. 2.3.13. Диаграммы направленности основной антенны $F_0(\theta)$ (сплошная кривая) и реальной компенсационной антенны $F_k(\theta)$ (штрихпунктирная кривая) показаны на рис. 2.3.13.

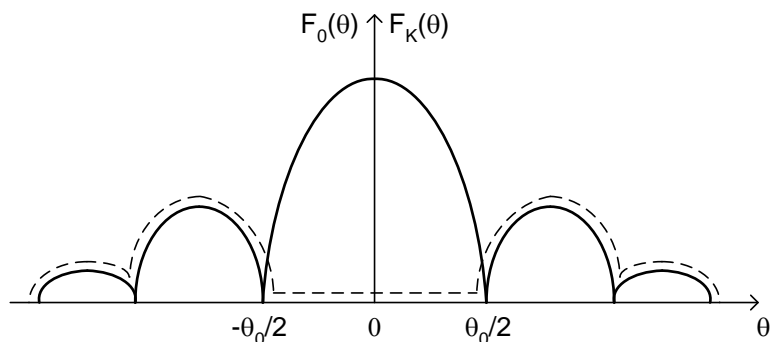


Рис. 2.3.13. Диаграммы направленности $F_0(\theta)$ и $F_k(\theta)$

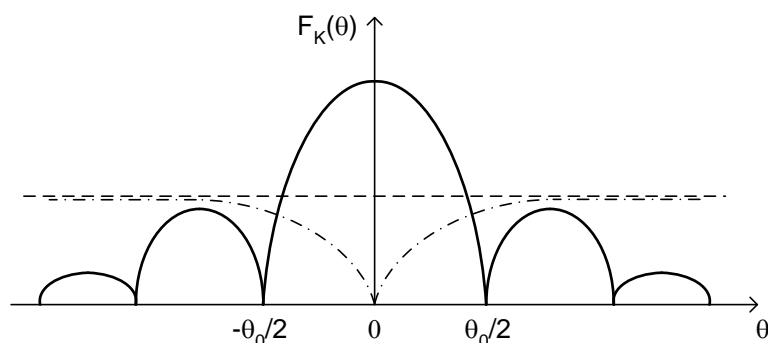


Рис. 2.3.14. Диаграмма направленности реальных антенн

Когерентный метод компенсации помех

Сущность метода — получение одинаковых по интенсивности и противоположных по фазе помеховых сигналов на выходах УВЧ или УПЧ и последующее их сложение (рис. 2.3.15).

Так как обработка сигналов осуществляется в линейных устройствах (до детектора), данный метод обеспечивает полную компенсацию помех без ослабления полезного сигнала (при оптимальной форме ДН A_k). При отличии ДН A_k от оптимальной степень ослабления полезного сигнала будет в этом методе все равно меньше (так как не производится нелинейная обработка сигналов и отсутствует подавление сигнала помехой). Основной задачей при данном методе компенсации помех, действующих по боковым лепесткам ДНА, является обеспечение на выходе УВЧ (УПЧ)

компенсационного канала напряжения помехового сигнала $U_{пк}$ противофазным $U_{по}$ при одинаковой интенсивности.

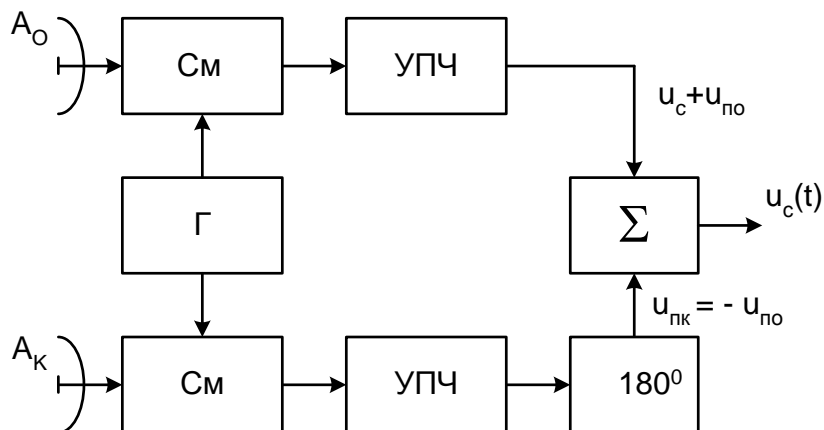


Рис. 2.3.15. Структурная схема когерентного компенсатора помех

Схема компенсации помех с системами АРУ и фазовой автоподстройки частоты

В данной схеме (рис. 2.3.16) система АРУ₀ обеспечивает неизменный уровень напряжения на выходе основного канала, система АРУ_к работает под действием сигнала, равного разности выходных напряжений помех УПЧ₀ и УПЧ_к. Регулировка прекращается, когда разность станет равной нулю, то есть когда интенсивности сигналов станут одинаковыми, система ФАПЧ обеспечивает синфазность помеховых сигналов с выходов УПЧ₀ и УПЧ_к, а с учетом сдвига по фазе на 180^0 – противофазность сигналов на выходе сумматора.

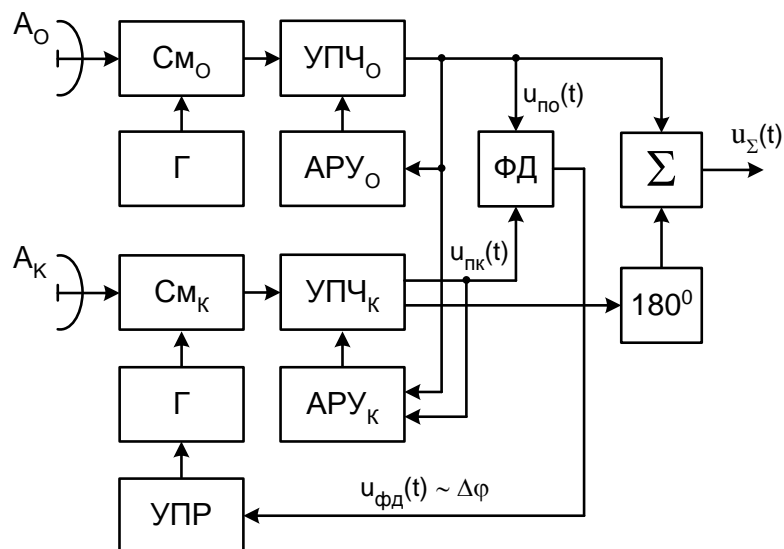


Рис. 2.3.16. Схема компенсации помех с системами АРУ и ФАПЧ

2.3.7. Повышение помехоустойчивости РЭС методами частотной селекции

Перестройка несущей частоты

Подавить РЭС можно только в тех случаях, когда помеха попадает в полосу пропускания приемника. Поэтому выделить полезный сигнал из помех можно перестройкой РЭС по частоте. Рабочие частоты РЭС изменяются перестройкой ВЧ тракта вручную оператором или автоматически.

Многоканальность РЛС

В многоканальных РЛС обеспечивается одновременная работа на нескольких частотах, разнесенных по диапазону (до сотен мегагерц). Принимаемые отраженные сигналы обрабатываются совместно в общем выходном устройстве. Многоканальная (многочастотная) РЛС по сравнению с одноканальной позволяет: увеличить суммарную мощность излучения, обеспечить большую дальность обнаружения целей при заданной мощности излучения, повысить надежность работы и защищенность станции от организованных и естественных помех.

Для повышения защищенности многоканальной РЛС от активных шумовых помех могут быть применены различные варианты совместной обработки выходных сигналов отдельных каналов. Например, в 3-частотной РЛС:

$$1) U_{\text{вых}\Sigma} = K(U_1 + U_2 + U_3);$$

$$2) U_{\text{вых}\Sigma} = K(U_1U_2 + U_2U_3 + U_1U_3);$$

$$3) U_{\text{вых}\Sigma} = K U_1U_2U_3.$$

В порядке перечисления варианты характеризуются последовательным ухудшением характеристик обнаружения, но повышением помехозащищенности.

Изменение частоты повторения импульсов

Изменение частоты повторения $F_{\text{и}}$ зондирующих импульсов (вобуляция) обеспечивает защиту от многократных ответных помех и ХИП, устранение слепых скоростей в когерентных РЛС с селекцией движущихся целей.

Череспериодная компенсация помех (ЧПК)

Схемы ЧПК (рис. 2.3.17) используются в системах СДЦ импульсных РЛС с большой скважностью импульсов для защиты от ПП, создаваемых с помощью дипольных отражателей (ДО) и отражениями от земли и местных предметов.

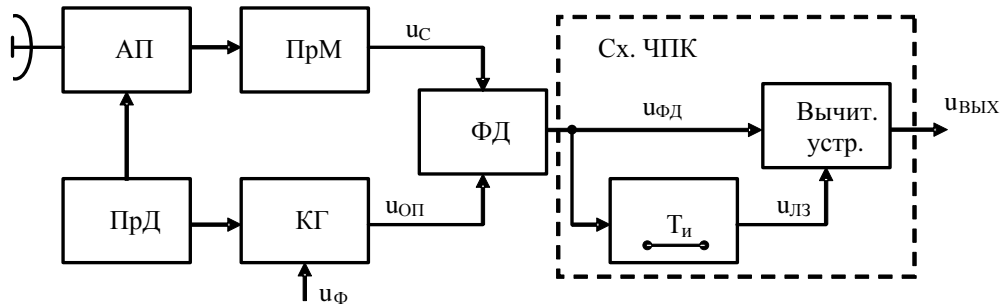


Рис. 2.3.17. Схема РЛС с ЧПК (с внутренней когерентностью)

Принцип работы СДЦ (рис. 3.18) заключается в сравнении фаз колебаний принятого сигнала u_c и опорного колебания $u_{оп}$ когерентного гетеродина (КГ).

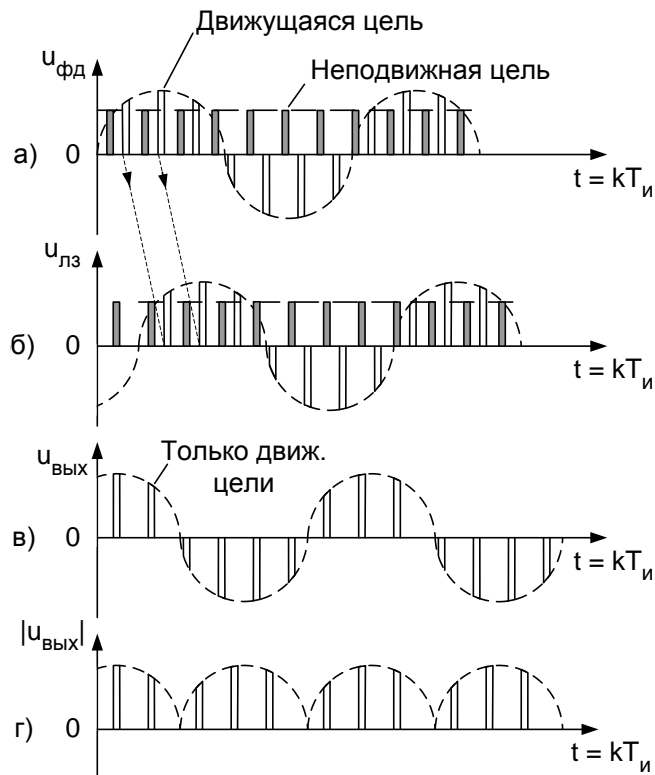


Рис. 2.3.18. Принцип работы схемы ЧПК

2.3.8. Повышение помехоустойчивости РЭС методами амплитудной и амплитудно-частотной селекции

Селекция сигналов при ограничении их снизу

Этот вид селекции применяется в тех случаях, когда амплитуда полезного сигнала существенно превышает амплитуду помехи. Селекция осуществляется амплитудным селектором, представляющим собой ограничитель снизу или ждущий генератор импульсов. При использовании ограничителя снизу напряжение $U_{вых}$ на его выходе появляется только в том случае, когда входное напряжение $U_{вх}$ превышает уровень ограничения $U_{огр}$

Селекция импульсов по уровню

Селекция такого вида целесообразна в тех случаях, когда амплитуда полезного сигнала существенно меньше амплитуды помехи либо амплитуда полезного сигнала колеблется вблизи какого-то уровня. Можно выделить импульсы напряжения, амплитуда $U_{вх}$ которых меньше заданного порогового уровня $U_{огр}$. На выход селектора проходят сигналы, для которых выполняется условие

$$U_{вх} < U_{огр}.$$

Для селекции импульсов малой амплитуды совместно используются ограничитель снизу и логическая схема запрещения (ЗАПРЕТ).

Повышение помехоустойчивости РЭС методами амплитудно-частотной селекции

При амплитудно-частотной селекции (АЧС) выделение полезных сигналов в присутствии помех основывается на использовании их различий по амплитуде, по частоте и по ширине спектра одновременно. Типичным для осуществления АЧС является устройство, выполненное по схеме широкополосного усилителя – ограничителя амплитудного – узкополосного усилителя (ШОУ) (рис. 2.3.19). Это устройство широко используется в радиосвязи для борьбы в приемном тракте с импульсными помехами большой амплитуды и малой длительности. Схема ШОУ размещается на входе приемного устройства

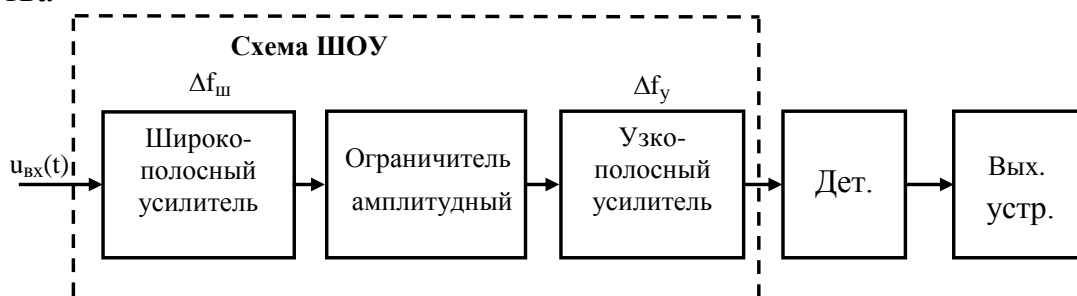


Рис. 2.3.19. Приемное устройство со схемой ШОУ

2.3.9. Повышение помехоустойчивости РЭС методами временной селекции

Повышение помехоустойчивости РЭС методами временной селекции

Временная селекция полезных импульсных сигналов на фоне помех основана на отличии селектируемых импульсов от импульсов помех по временному положению (фазе), частоте повторения и длительности. Для импульсных РЭС наряду с шумовыми помехами достаточно универсальными считаются хаотические импульсные помехи (ХИП).

Селекция импульсов по временному положению

Селекция импульсов по временному положению часто реализуется в импульсных автодальномерах, вырабатывающих сигналы стробирования (отпираания) радиоприемников на время действия принимаемых полезных импульсов. Такие автодальномеры обеспечивают защиту от несинхронных импульсных помех, а также от импульсных помех, синхронных по периоду повторения с полезными сигналами, но отличающихся от последних временем действия. Кроме того, автодальномеры повышают устойчивость РЛС по отношению к помехам типа отражений радиосигналов от протяженных целей.

Система автоматической временной селекции системы автосопроявления дальности (АСД) представлена на рис. 2.3.20.

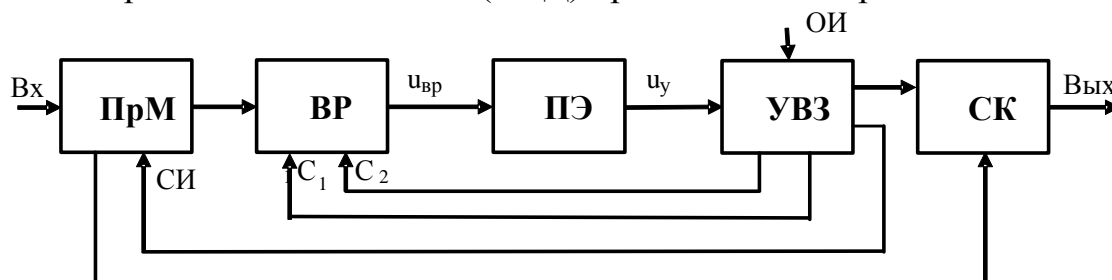


Рис. 2.3.20. Схема системы АСД

Функциональная схема такой системы АСД состоит из временного различителя (ВР), промежуточных элементов (ПЭ) (ФНЧ, корректор цепи, интегратор) и устройства временной задержки (УВЗ), с которого на временной различитель подаются следящие импульсы C_1 и C_2 . Во временном различителе, соединенном с приемником (ПрМ), вырабатывается напряжение $u_{вр}$, зависящее от временного рассогласования ξ между осью подлежащих селекции импульсов И (рис. 2.3.21) и осью следящих импульсов C_1, C_2 . Последние задерживаются относительно опорных импульсов (ОИ) последовательности на время $t_{и}$, пропорциональное управляющему напряжению u_y , снимаемому с промежуточных элементов (ПЭ)

$$t_{и} = t_{и0} + k_y u_y, \quad (2.3.26)$$

где $t_{и0}$ – начальная временная задержка, соответствующая $u_y = 0$.

Без ограничения общности можно принять $t_{и0} = 0$.

Таким образом, на УВЗ можно смотреть как на преобразователь u_y в $t_{и}$ с коэффициентом K_y . ВР – сравнивающий элемент системы, который действует в течение короткого (по сравнению с временем следования опорных импульсов $T_{и}$) времени и осуществляет преобразование временного рассогласования $\xi = t_{вх} - t_{и}$ в напряжение $u_{вр}$. ВР любого типа является устройством, где линейный

участок характеристики имеет сравнительно малую протяженность, не превышающую 2–3 длительности селектируемого импульса. За пределами линейного участка характеристики, когда следящие и селектируемые импульсы выходят из «зацепления», $u_{вр} = 0$. Это свойство ВР положено в основу селекции по временному положению входных импульсов.

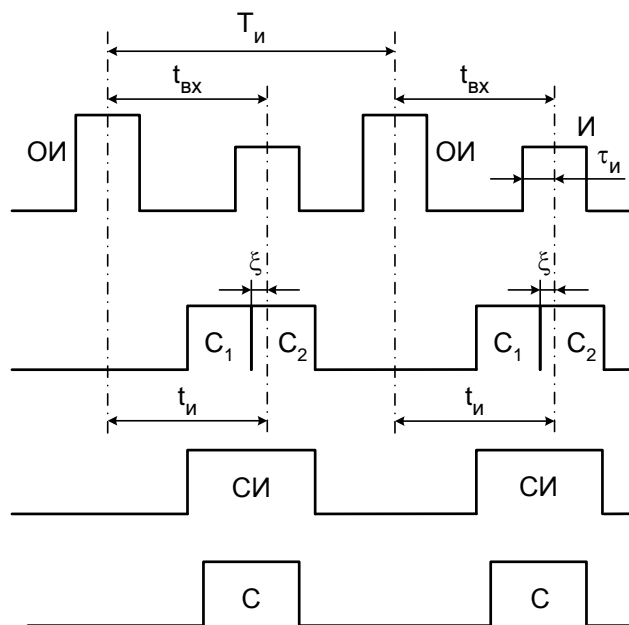


Рис. 2.3.21. Принцип работы системы АСД

Следящая система действует так, что временное рассогласование ξ поддерживается небольшим, и всякое изменение ξ влечет за собой такое изменение $u_{вр}$ (и соответственно u_y), при котором следящие импульсы C_1 и C_2 , вырабатываемые в УВЗ, смещаются в сторону уменьшения ξ . В типовом случае система АСД содержит два интегратора со стабилизирующей цепью. При этом чаще используется интегрирующий ВР и дополнительный интегратор в ПЭ; реже применяют пропорциональный ВР и два интегратора в ПЭ.

Временная селекция обеспечивается подачей в ПрМ специального селекторного импульса (СИ), вырабатываемого в УВЗ. Приемник все время заперт и отпирается только на время поступления СИ. Последний перемещается вместе со следящими импульсами. Его длительность выбирается так, чтобы не деформировать дискриминационную характеристику ВР. Обычно длительность СИ близка к суммарной длительности следящих импульсов. На вход ВР системы АСД должны подаваться импульсы постоянной амплитуды, поскольку в противном случае коэффициент передачи системы будет непостоянным. Если информация, которую несет последовательность селектируемых импульсов, заключена в их амплитуде (в системах с коническим сканированием), удобно установить один селекторный код (СК), на который с УВЗ подается отпирающий импульс С, лишь немного превосходящий по длительности селектируемые импульсы.

Таким образом обеспечивается подавление импульсов, не попадающих в раствор характеристики ВР. Заметим, что система АСД, помимо исключения несинхронных импульсных помех, дает определенный выигрыш в отношении флуктуационных шумов.

Рассматриваемая следящая относится к классу импульсных систем автоматического регулирования. Однако параметры большинства практических систем таковы, что импульсная система может быть заменена непрерывным динамическим эквивалентом, который имеет близкие характеристики.

Селекция импульсов по частоте повторения

Селекция основывается на совпадении двух потоков импульсов. Один из них принимается приемным устройством, другой (опорные импульсы) образуется в селекторном устройстве. На выход проходят лишь линии импульса, совпадающие по времени с образованными опорными импульсами.

При точно известном (и почти постоянном) периоде повторения импульсов $T_{и}$ можно использовать схему с каскадами совпадений, действующую по разомкнутому циклу. Известны две разновидности таких схем (рис. 2.3.22).

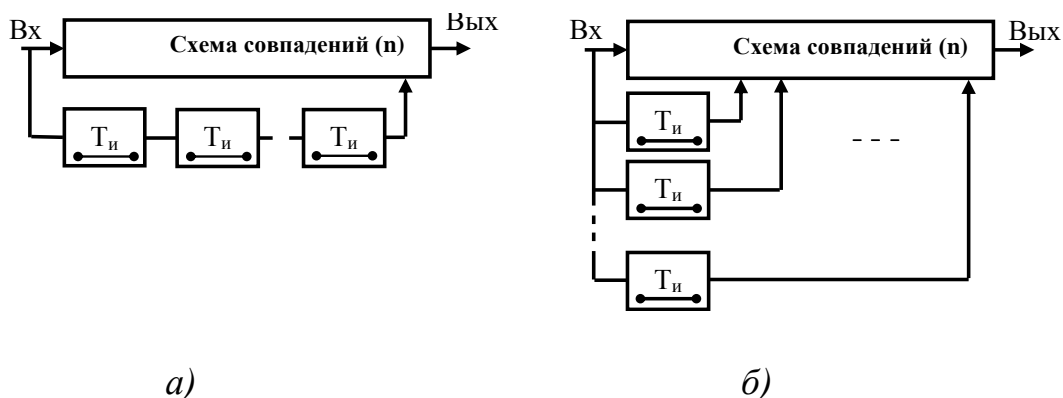


Рис. 2.3.22. Схемы селекции импульсов по частоте повторения

В первой из них на схему совпадений n импульсов поступают сигналы с последовательно включенных линий задержек ЛЗ₁, ЛЗ₂, ... на период $T_{и}$ каждая. Во второй используются параллельно включенные линии задержки с временем задержки на $t_3 = T_{и}, 2T_{и}, \dots, (n - 1)T_{и}$ каждая. Различие в этих схемах носит в основном конструктивный характер (первую схему выполнить технически проще). Сигнал на выходе схем совпадений появляется только в том случае, когда частота повторения входных импульсов равна (или кратна) временам задержки. Диаграмма работы схемы для трехимпульсной схемы совпадений дана на рис. 2.3.23, откуда видно, что на выход проходят только импульсы с периодом, равным $T_{и} = t_3$.

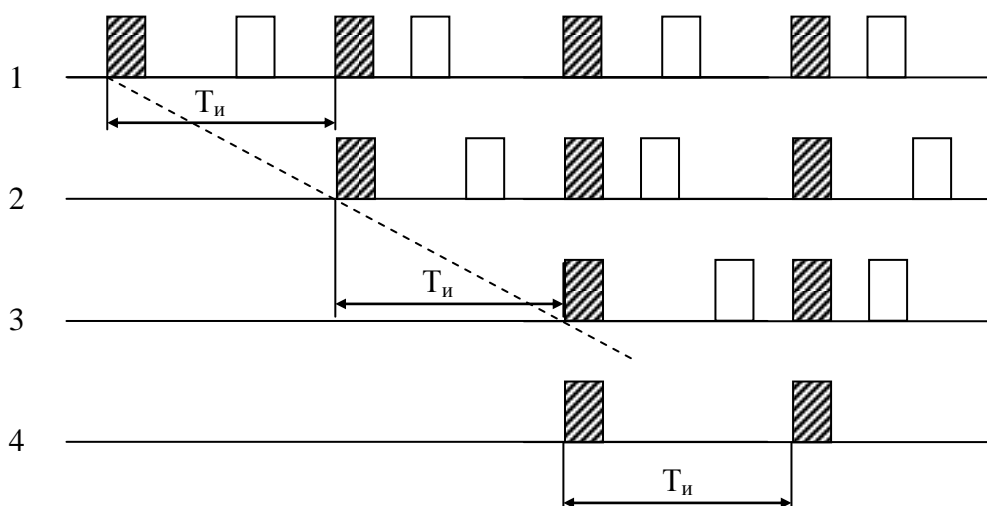


Рис. 2.3.23. Диаграмма работы схемы для 3-импульсной схемы совпадений

Селекция импульсов по длительности

Схема (рис. 2.3.24) позволяет селектировать импульсы, длительность которых меньше заданной величины, превосходит ее или равна ей.

Входная последовательность поступает на селектор длительности (СД), который пропускает на выход импульсы выбранной длительности. Из этих импульсов в ФУ образуется стандартный импульс, длительность которого соответствует заданной для селекции. Затем следует КС, который пропускает отселектированный импульс. Линия задержки (ЛЗ) предназначена для задержки входных импульсов на время, равное временной задержке в формирующем устройстве (ФУ). Такая схема обеспечивает неискаженную передачу селектирующих импульсов.

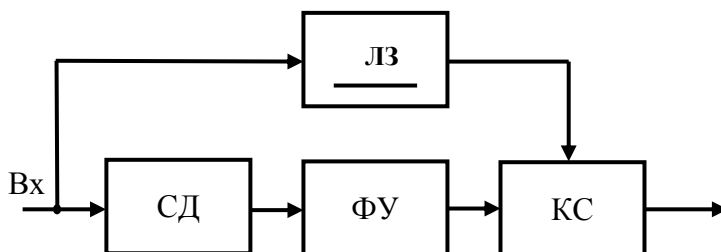


Рис. 2.3.24. Общая схема селектора импульсов по длительности

2.4. Обеспечение ЭМСРЭС

2.4.1. Обеспечение ЭМСсобственныхРЭС

Проблема обеспечения ЭМС собственных РЭС

Массовое использование РЭС различного назначения привело к возникновению мешающего влияния их друг на друга за счет создания непреднамеренных взаимных помех, которые затрудняют

или исключают возможность их нормальной совместной работы (например: взаимные помехи двух несинхронизированных РЭС).

Обеспечение совместной работы различных РЭС, т.е. электромагнитной совместимости (ЭМС), с каждым годом имеет все большее значение. Значимость проблемы ЭМС и ее обострение определяется не только значительным ростом количества, многообразием и сложностью самих РЭС, являющихся естественным следствием внедрения радиоэлектроники в различные сферы производства и потребления, но и проявляющейся иногда ее недооценкой, непосредственно отвечающими за нормальное функционирование РЭС. Прогресс в области радиотехники стал все более сдерживаться отрицательными явлениями, порожденными ее количественным ростом.

В соответствии с ГОСТ, ЭМС – это способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам.

Причины, вызывающие обострение проблемы ЭМС

1. Возрастание общего числа одновременно работающих РЭС.
2. Ограниченность и загруженность используемого диапазона частот. Перегрузка отдельных участков диапазона и многократность. В настоящее время РЭС могут работать в диапазоне от 10 Гц до 400 ГГц. Наиболее интенсивно загружен диапазон от 3 кГц до 15 ГГц, в котором отдельные участки сильно перегружены (например; 100-150 МГц; 200-400 МГц, 1-1,5 ГГц; 2,5-3 ГГц, 8-12 ГГц).
3. Увеличение мощности передатчиков.
4. Повышение чувствительности радиоприемных устройств до уровней 10^{-12} – 10^{-16} Вт и ниже.
5. Несовершенство антенных устройств, передатчиков и приемников.
6. Широкое внедрение электронных средств автоматического управления, контроля диагностики на основе аналоговой и цифровой техники (микропроцессоров), которые становятся источниками непреднамеренных помех и одновременно подвергаются их воздействию.

Факторы, влияющие на ЭМС

РЭС, создающие в процессе работы непреднамеренные помехи, называют источниками электромагнитных помех (ИП). Устройства, подвергающиеся воздействию непреднамеренных помех, называют рецепторами электромагнитных помех (РП). РЭС может быть как источником, так и рецептором электромагнитных помех.

В случае свободно распространяющихся волн уровень помех зависит от мощности источников помех, расстояния между источником помех и рецептором помех, длины волны помехи, параметров среды распространения.

Влияние источников помех на рецепторы помех может быть вызвано наличием общих элементов в электрических цепях. В этом случае говорят о гальванической связи цепей ИП и РП (например, за счет наличия общих участков в цепях питания, заземления и т.п.). Так, воздействие помех на различные наземные РЭС может проявляться за счет изменения режима энергопотребления: при включении мощной нагрузки изменяются условия работы различных РЭС из-за изменения напряжения электропитания и возникающих при этом переходных процессов. При действии на РП мощной помехи возможны необратимые отказы аппаратуры, в первую очередь из-за изменения структуры полупроводниковых материалов.

В зависимости от места расположения ИП и РП различают задачи обеспечения ЭМС РЭС, размещенных на одном объекте (ЛА, узле связи...) и на заданной местности. Обобщенная схема воздействия помех на РП имеет вид, представленный на рис. 2.4.1.

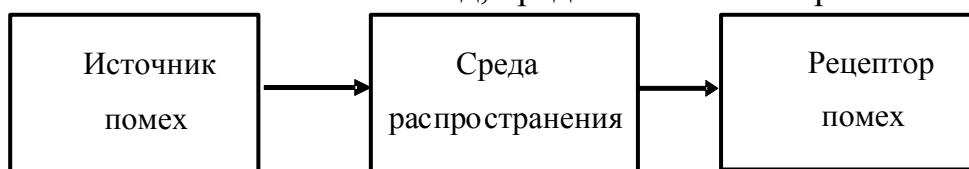


Рис. 2.4.1. Обобщенная схема воздействия помех на РЭС

Характеристики нежелательных излучений радиопередающих устройств РЭС и методы борьбы с ними

Излучения передающих устройств делятся на (рис. 2.4.2) основное и неосновное (нежелательное).

Основное излучение определяется функциональным назначением данного средства и занимает необходимую для передачи полосу частот предназначенных для передачи сигнала.

Неосновное (нежелательное) радиоизлучение – излучение радиопередающего устройства за пределами необходимой полосы радиочастот.

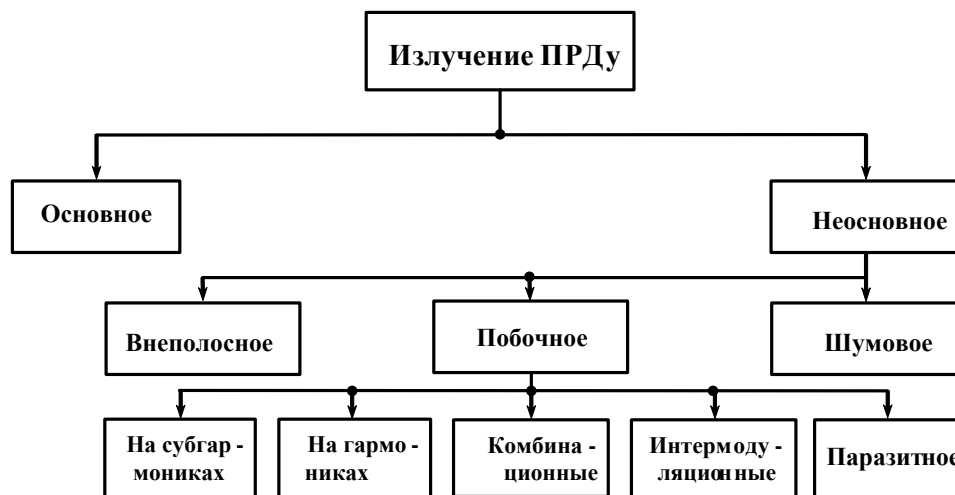


Рис. 2.4.2. Классификация излучений передающего устройства

Неосновные излучения

1. Внеполосное – занимает области частот основного излучения и является результатом модуляции сигнала (при отсутствии модуляции оно также отсутствует). *Внеполосное радиоизлучение* – нежелательное радиоизлучение в полосе частот, примыкающей к необходимой полосе радиочастот, является результатом модуляции сигнала.

2. Шумовое – обусловлено собственными шумами элементов передающего устройства и паразитной модуляцией основного колебания шумовым напряжением. Источниками шумов являются электровакуумные и полупроводниковые приборы в различных каскадах передатчиков (уровень шумов много выше, чем в аналогичных приборах приемников).

3. Побочное – обусловлено различными нелинейными процессами в передающем устройстве, кроме процесса модуляции сигнала. Побочное радиоизлучение – нежелательное радиоизлучение, возникающее в результате любых нелинейных процессов в радиопередающем устройстве, кроме процесса модуляции.

Побочное излучение включает излучение на гармониках, на субгармониках, комбинационное, интермодуляционное, паразитное.

Излучение на гармониках – это излучение на частотах, в целое число раз больше несущей частоты основного излучения $f_2 = n f_c$, где $n = 2, 3, \dots$

Причиной излучения на гармониках является нелинейность амплитудных и фазовых характеристик активных элементов (например, в режиме работы с отсечкой тока). Конечным результатом этого является то, что выходное немодулированное колебание имеет форму, отличающуюся от гармонической и, следовательно, представляет собой сумму колебаний основной частоты и ее гармоник. Например, в магнетронах средний уровень 2-3 гармоник около 45 дБ; ЛБВ – 40 дБ. Уменьшение уровней гармоник

обеспечивается применением элементов фильтрации в выходных устройствах передатчиков.

Излучение на субгармониках – это излучение на частотах, в целое число раз меньших основного излучения $f_{сг} = f_c / n$, где $n = 2, 3, 4 \dots$. Субгармоники возникают в передатчиках, в которых для получения основной частоты используют умножители частоты.

Комбинационное излучение возникает в передатчиках при формировании основного сигнала, в которых осуществляется путем нелинейного преобразования колебаний двух и более вспомогательных генераторов.

Интермодуляционное (взаимно-модуляционное) излучение возникает в передатчике при воздействии на него излучения других передатчиков. Проявляется в случаях, когда между одновременно работающими передатчиками имеется функциональная или конструктивная связь (например, при совместной работе нескольких передатчиков на общую антенну) и когда передающие антенны различных РЭС расположены близко друг от друга (и не приняты меры по их развязке, например, на самолете). Причиной возникновения интермодуляционного излучения является нелинейность выходных каскадов передатчика. В результате нелинейного взаимодействия образуется интермодуляционное излучение на частоте $f_{инт} = |mf_{c1} \pm nf_{c2}|$.

Паразитное излучение – излучение, не связанное с формированием основного излучения. Наличие паразитного излучения обусловлено влиянием паразитных реактивных сопротивлений и обратных связей в каскадах передатчика, приводящим к выполнению условий самовозбуждения на частотах, отличных от несущей частоты основного излучения. Паразитные излучения могут иметь место на частотах как ниже, так и выше основной частоты. Устранить паразитное излучение можно, уменьшая обратную связь или увеличивая затухание колебательной системы (введением в схему передатчика антипаразитных активных сопротивлений, подбором электровакуумных приборов).

Кроме рассмотренных видов неосновных передатчиков, на практике приходится учитывать излучения гетеродинов приемных устройств, которые могут проникать в приемную антенну и создавать взаимные помехи.

Характеристики нежелательных каналов приема радиоприемных устройств и некоторые методы борьбы с ними

Любой реальный приемник в той или иной мере обладает способностью к приему сигналов за пределами требуемой полосы частот. Свойство приемника реагировать на помехи характеризуется *восприимчивостью*.

Для описания воздействия помех пользуются понятием «канал приема». Помимо *основного канала приема*, предназначенного для приема полезного сигнала, существуют *неосновные каналы приема* (рис. 2.4.3), наличие которых обусловлено несовершенством ВЧ-фильтров, а также нелинейными устройствами радиоприемника (чаще всего смесителем в супергетеродинных приемниках), таким образом, в супергетеродинных приемниках большинство неосновных каналов приема связано с самим принципом построения на основе преобразования частоты.

Современные приемники могут иметь до нескольких десятков неосновных каналов приема.

Принято подразделять неосновные каналы приема на соседние и побочные.

Соседние каналы непосредственно примыкают к основному каналу и обусловлены недостаточной частотной избирательностью приемного устройства из-за неидеальных частотных характеристик линейных каскадов приемника (преселекторы, УРЧ и УПЧ), характеристики которых всегда отличаются от прямоугольных.

Прием по соседнему каналу называют прямым прохождением помех.

Побочные каналы приема находятся за границей основного и соседних каналов и присущи приемникам супергетеродинного типа.

К побочным относятся канал приема на промежуточной частоте, зеркальный канал приема, каналы приема на частотах субгармоник частоты настройки, комбинационные каналы приема, интермодуляционные каналы приема.

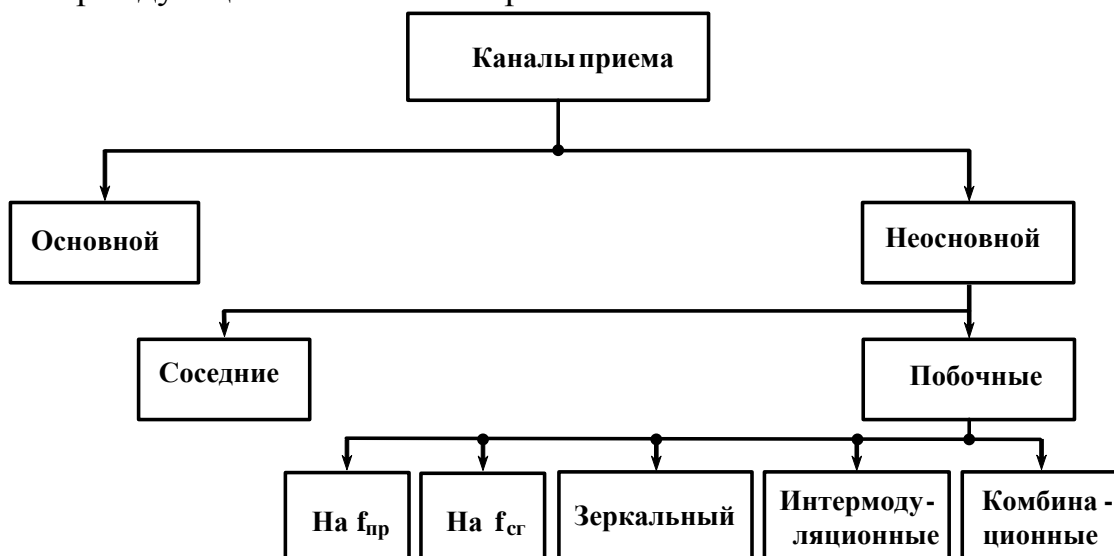


Рис. 2.4.3. Классификация каналов приема радиосигналов

В супергетеродинных приемниках образование побочных каналов приема связано с процессом преобразования частоты. Частотная избирательность таких приемников определяется главным образом УПЧ. Поэтому на смеситель приемника могут воздействовать

помеховые сигналы, частоты которых значительно отличаются от частоты основного канала f_c (из-за низкой избирательности каскадов приемника, предшествующих смесителю).

По принципу действия супергетеродинного приемника частота гетеродина f_r выбирается такой, чтобы $|f_r - f_c| = f_{пр}$ и колебания разностной промежуточной частоты попали в полосу пропускания УПЧ $\Delta f_{упч}$.

Комбинационные каналы приема образуются за счет взаимодействия помехового сигнала с частотой $f_{п} \neq f_c$ и сигнала гетеродина с частотой f_r в смесителе приемника.

Так как смеситель является нелинейным устройством, на его выходе образуются колебания с комбинационными частотами

$$f_k = |mf_r \pm nf_{п}|, \quad (2.4.1)$$

где m и $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

При определенных значениях $f_{п}$, m , n колебания с частотой f_k могут оказаться в пределах полосы пропускания УПЧ

$$|mf_r \pm nf_{п}| \approx f_{пр}. \quad (2.4.2)$$

Выражение (4.2) является частотным условием возникновения побочных каналов. Помеха, удовлетворяющая условию (2.4.2), далее беспрепятственно может пройти на выход приемника через УПЧ, настроенный на $f_{пр}$. Из этого следуют частные случаи:

1. При $f_{п} = f_{пр}$ и ($m = 0; n = 1$), $f_k = 0 \cdot f_r + 1 \cdot f_{пр} = f_{пр}$ – образуется канал приема на промежуточной частоте, т.е. возможен прием сигнала помехи, несущая частота которого равна $f_{пр}$. Уменьшить влияние данного канала можно повышением селективности входных цепей и УРЧ (рис. 2.4.4), выбором промежуточной частоты таким образом, чтобы ее значение не совпадало с рабочими частотами близко расположенных передатчиков.

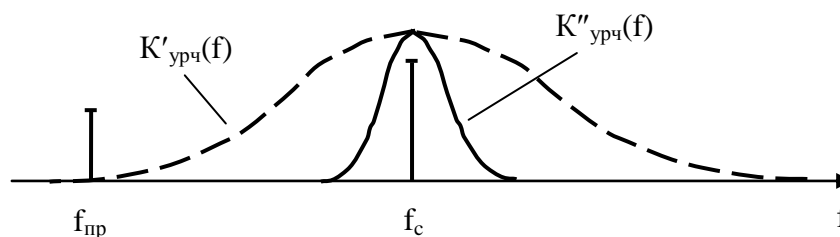


Рис. 2.4.4. Уменьшение влияния канала повышением селективности входных цепей и УРЧ

2. При $f_{п} = f_c + 2f_{пр} = f_r + f_{пр} = f_3$ ($m = -1; n = 1$), $f_k = -f_r + (f_{п} + f_{пр}) = f_{пр}$ – образуется зеркальный канал приема при верхней настройке гетеродина (рис. 2.4.5).

Помеховый сигнал называется *зеркальным*, т.к. он расположен на частотной оси симметрично с полезным сигналом относительно частоты гетеродина f_r .

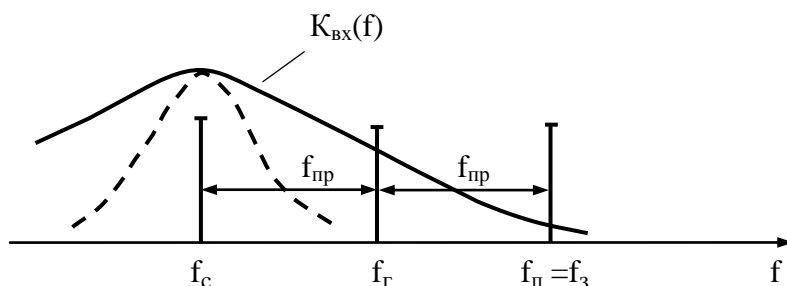


Рис. 2.4.5. Образование зеркального канала приема при верхней настройке гетеродина

3. В случае нижней настройки гетеродина ($f_r = f_c - f_{пр}$) зеркальный канал приема будет образовываться при (рис. 2.4.6)

$$f_{п} = f_{з} = f_c - 2f_{пр} = f_r - f_{пр} \quad \text{и} \quad (m = 1; n = -1).$$

Тогда $f_{к} = f_{з} = f_r - (f_r - f_{пр}) = f_{пр}$.

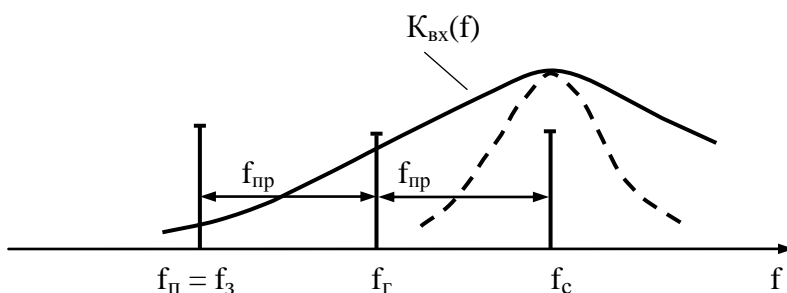


Рис. 2.4.6. Образование зеркального канала приема при нижней настройке гетеродина

В общем случае зеркальный канал образуется при

$$f_{п} = f_r \pm \Delta f_{пр} \quad \text{и} \quad |m| = 1; |n| = 1. \quad (2.4.3)$$

Уменьшить помеху по зрительному каналу можно улучшением избирательных свойств входного ВЧ-тракта, выбором более высокой промежуточной частоты, использованием специальных схем преобразователей частоты с компенсацией помех по зеркальному каналу (двухбалансные схемы).

4. При $f_{п} = \frac{f_c}{n} = f_{сг}$ и $\begin{cases} n = 2, 3, 4... \\ m = 1 \end{cases}$, образуется канал приема на

субгармониках $f_{к} = f_r - \frac{nf_c}{n} = f_{пр}$.

5. При всех других сочетаниях m и n образуются комбинационные каналы приема $f_{к} = |mf_r \pm nf_{п}| = f_{пр}$.

Уменьшения приема на комбинационных частотах можно добиться применением специальных схем защиты, применением в

смесителях таких нелинейных элементов, характеристики которых не вызывают возникновения комбинационных каналов высоких порядков (наиболее целесообразно применять не с квадратичными ВАХ, которые могут создать только зеркальный канал приема).

6. Интермодуляционные каналы приема возникают в том случае, когда на приемник действуют два или более помеховых сигнала. Они являются одними из наиболее важных причин взаимных помех. Так, в системах связи метрового диапазона на долю интермодуляции приходится до 70% случаев нарушения ЭМС непреднамеренными помехами.

Интермодуляционные каналы приема возникают при прохождении через преселектор двух и более помех на частотах f_1, f_2, \dots, f_n , которые в смесителе образуют сигналы с комбинационными частотами $n_1 f_{п1} \pm n_2 f_{п2} \pm \dots \pm n_n f_{пn}$, где n_1, n_2, \dots, n_n – целые числа.

Если какая-либо одна или несколько комбинационных частот попадают в полосу пропускания УПЧ, то создается интермодуляционный побочный канал приема.

Наиболее опасными оказываются каналы, образованные двумя мешающими сигналами, частоты которых удовлетворяют условиям:

$$f_{п1} \pm f_{п2} = f_c;$$

$$2f_{п1} - f_{п2} = f_c;$$

$$2f_{п2} - f_{п1} = f_c.$$

Для уменьшения влияния интермодуляционного канала приема следует повышать частотную избирательность преселектора и уменьшать усиление в УРЧ.

2.4.2. Технические способы обеспечения ЭМС РЭС

Технические средства и способы обеспечения ЭМС РЭС реализуются в принципах построения РЭС, способах приема и обработки информации и применяются прежде всего при конструировании и частично в процессе эксплуатации РЭС.

Они принципиально не отличаются от способов защиты от преднамеренных помех и основываются на использовании частотных, пространственных, временных, информационных и других различий между полезным сигналом и помехами.

К техническим методам обеспечения ЭМС относятся:

1. Снижение мощности побочных и внеполосных излучений и чувствительности неосновных каналов приема путем выбора формы излучений сигналов, вида и параметров модуляции, схем усилителей и генераторов, а также применяемых в этих схемах ЭВП и ПП; правильного выбора промежуточной частоты приемника; увеличения коэффициента прямоугольности селективирующих трактов; фильтрации излучений радиопередающих устройств.

2. Применение антенн с направленным излучением.
3. Снижение уровней боковых лепестков ДН антенн взаимодействующих РЭС.
4. Применение схем временных селекций по длительности импульсов и частоте повторения.
5. Синхронизация запуска взаимодействующих РЭС.
6. Бланкирование мешающих сигналов и стробирование полученных сигналов.
7. Применение схем компенсации помех, основанных на приеме сигналов на две разнесенные антенны (рис. 2.4.7).

Принятые полезные и мешающие сигналы от A_1 через фазовращатель и от A_2 через аттенюатор подаются на сумматор. Изменяя фазовый сдвиг в фазовращателе и амплитуду сигналов с помощью аттенюатора, добиваются компенсации мешающего сигнала в сумматоре. В результате на приемник поступает только полезный сигнал.

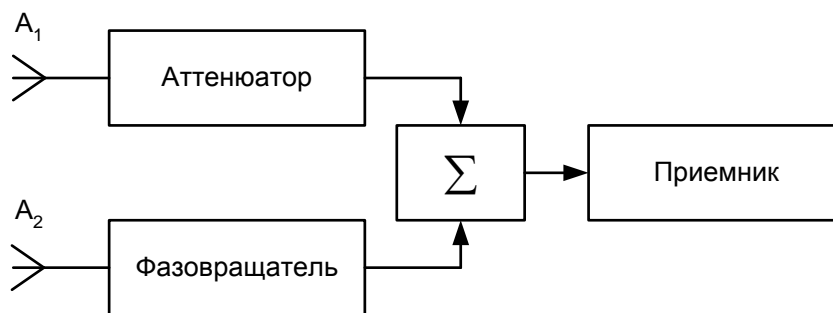


Рис. 2.4.7. Схема компенсации помех основанных на приеме сигналов на две разнесенные антенны

К техническим мерам обеспечения ЭМС РЭС относятся:

- задание ТТТ к РЭС в части ЭМС на этапе их разработки;
- нормирование и стандартизация ряда технических характеристик РЭС (ширины, полосы основного излучения передатчиков; уровней внеполосных и побочных излучений передатчиков; стабильности частоты передатчиков, чувствительности неосновных каналов приема; уровней боковых лепестков ДН).

При создании новой техники и строительстве объектов, оснащенных РЭС, создают модели ожидаемой электромагнитной обстановки (ЭМО), которые позволяют оценить ожидаемые уровни непреднамеренных помех и определить места размещения РЭС и их антенных систем.

Проверку выполнения требований и норм, направленных на обеспечение ЭМС, а также измерение параметров РЭС производят с помощью специальных КИП.

2.4.3. Организационные мероприятия обеспечения ЭМС

Организационные мероприятия реализуются при эксплуатации РЭС:

1. Рациональное распределение частот является основной мерой обеспечения ЭМС РЭС, работающих в одном районе. При этом назначаются несовпадающие частоты. Эффективность распределения и назначения частот характеризуется следующими данными:

– разнос рабочих частот РЭС на десятки-сотни килогерц в метровом и сотни тысячи килогерц в более коротковолновом диапазоне практически полностью исключает взаимные помехи между РЭС даже при размещении их на одной позиции;

– разнос РЭС по частоте не требует значительных затрат времени, может быть осуществлен на этапе планирования боевых действий.

В настоящее время задача распределения и назначения частот детально решается для средств радиосвязи. Задачи рационального использования радиочастотных диапазонов и нормирования радиоизлучений введены в государственные стандарты.

2. Пространственный разнос РЭС. При этом размещение РЭС на позиции может осуществляться с учетом их рабочих секторов. Для облегчения выбора районов размещения РЭС устанавливаются нормы частотно-территориального разноса (ЧТР), которые заключаются в установлении требуемых значений частотных расстроек между потенциально несовместимыми РЭС при заданных расстояниях между РЭС, либо в установлении требуемых расстояний между РЭС при заданных частотных расстройках.

3. Согласование работы РЭС по времени (установления очередности их работы), наложения запретов на работу отдельных РЭС в определенные интервалы времени (исходя из приоритета одних средств над другими в различных ситуациях), введения ограничений на режимы работы (например по получаемой мощности).

4. Выбор и оборудование позиций. Заключается в правильном использовании экранирующих свойств местности и местных предметов, а в ряде случаев – и в установлении искусственных экранов, приводящих к ослаблению мощности взаимных помех. Непреднамеренные помехи заметно ослабляются, если средства УКВ диапазона (находятся в пределах прямой видимости) располагаются так, чтобы между ними находились складки местности, лесные массивы и населенные пункты. Так, например, лиственный лес глубиной 100 м и в УКВ-диапазоне может ослабить излучаемую энергию в 10 раз, в ДЦМ-диапазоне – в 100 раз, в СМВ-диапазоне – в тысячу раз. Деревянные строения могут ослабить энергию в 10 – 20 раз, кирпичные здания – в 100 раз на каждый погонный метр прохождения радиоволн.

5. Организация обеспечения ЭМС РЭС в соответствии с изложенными выше мерами и способами не исключает полностью возможность возникновения взаимных радиопомех. В связи с этим с целью исключения внезапно возникающих интенсивных помех организуется выявление источников таких помех и устранение их мешающего воздействия.

6. Чтобы предотвратить возникновение взаимных помех, предусматривается контроль за соблюдением операторами установленных режимов работы РЭС.

Обеспечение безопасности полетов при наличии взаимных помех

1. Рациональное распределение и использование рабочих частот (f_n и F_n)

2. Строгое соблюдение установленных ограничений работы РЭС по рабочим частотам, времени и режимам работы.

3. Использование запасных каналов дублирующих средств не подверженных помехам или работающих на других физических принципах (барометрические измерители высоты, ИНС).

4. Построение боевых порядков, исключаящее и уменьшающее взаимные помехи (увеличение расстояний между ПП и боевыми самолетами).

5. Соблюдение радиодисциплины при работе в общих радиосетях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие содержит необходимый минимум сведений, который позволит студентам ориентироваться в вопросах электромагнитной совместимости при разработке конструкции различных радиоэлектронных средств.

В пособии приводятся теоретические основы системного подхода к проблеме электромагнитной совместимости, алгоритмов назначения оптимальных частот РЭС, источников образования и характеристик помех, методов борьбы с помехами, технических способов и средств защиты от помех, защиты приемных устройств от перегрузок, повышения помехоустойчивости РЭС методами пространственной селекции, повышения помехоустойчивости РЭС методами частотной селекции, повышения помехоустойчивости РЭС методами временной селекции, обеспечения и технических способов ЭМС собственных РЭС, организационных мероприятий обеспечения ЭМС.

Активное освоение материала учебного пособия позволит студентам перейти к знакомству с работами, указанными, например, в списках рекомендуемой литературы, а также к изучению других предметов по избранной специальности, подготовит к выполнению магистерских работ. К каждому занятию, лекции нужно готовиться заранее. В этом случае эффективность освоения и усвоения нового материала повысится многократно, придет глубокое понимание, а значит, появится возможность использовать данный материал на практике.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ УЧЕБНОЙ И НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жариков, В.Д. История и методология науки: от Аристотеля до наших дней: учебное пособие / В. Д. Жариков, М. К. Кривенцева, Р. В. Жариков. - Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2009. - 114 с.
2. Тютюнник, В.М. История и методология науки [Электронный ресурс]: метод.реком. для магистрантов обуч. по направ. 210200 / В. М. Тютюнник. - Электрон.дан. (176 Кб). - Тамбов: ТГТУ, 2010.
3. Чернышов, Е.А. Основы инженерного творчества в дипломном проектировании и магистерских диссертациях: учебное пособие для вузов / Е. А. Чернышов. - М.: Высш. шк., 2008. - 254 с.
4. Золотинкина, Л.И. А.С. Попов - Э. Дюкрете Письма и документы 1898-1905 гг./ Л.И. Золотинкина, Е.И. Красникова, М.А. Партала. – СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.
5. Золотинкина, Л.И. А.С. Попов в Петербурге и в Кронштадте / Л.И. Золотинкина, Е.И. Красникова, Д.В. Сергеев. – СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.
6. Ушаков, В.Н. Из истории изобретения и начального периода развития радиосвязи/В.Н. Ушаков, Л.И. Золотинкина, Ю.Е. Лавренко. – СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.
7. Дворецкий, С.И. Инновационно-ориентированная подготовка инженерных, научных и научно-педагогических кадров: монография / С. И. Дворецкий, Е. И. Муратова, И. В. Федоров. - Тамбов: ТГТУ, 2009. - 308 с.
8. Степин, В.С. Научная картина мира в культуре техногенной цивилизации / В.С. Степин, Л.Ф. Кузнецова. – М., 1994. (<http://www.philosophy.ru/iphras/library/step1.html>).
9. Культурология: Учеб. пособие / Под ред. Е. Я. Букиной. – Новосибирск, 2007. – Главы 8, 9. (http://ciu.nstu.ru/chair_sites/tik/)
10. Азерников, В. Физика. Великие открытия. – М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2001.-270 с.: ил. – (Популярная школьная энциклопедия).
11. Спасский Б.И. История физики: учебное пособие для вузов. Ч.1 / Б.И. Спасский. - М.: Высш. школа, 1977. - 320 с.
12. Спасский, Б.И. История физики: учебное пособие для вузов. Ч 2. / Б. И. Спасский. - М.: Высш. школа, 1977. - 311 с.
13. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5-и кн.: Кн. 5-я: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учеб.пособие для втузов / И. В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2004. - 368 с.
14. Кибернетика и вычислительная техника: сб. ст. Вып. 1 / под ред. В. А. Мельникова. - М.: Наука, 1985. - 211 с.:
15. Зворыкин, А.А. История техники / А. А. Зворыкин, Осьмова Н.И., Чернышов В.И., Шухардин С.В. - М.: Соцэкгиз, 1962. - 772 с.

16. Белькинд, Л.Д. История техники / Л. Д. Белькинд, И. Я. Конфедератов, Я. А. Шнейберг. - М.: Госиздат, 1956. - 491 с.:
17. Пузырев, Н.М. Краткая история науки и техники: учебное пособие / Н. М. Пузырев. - 2-е изд. - Тверь: ТГТУ, 2003. - 204 с.
18. Черняк, В.З. История и философия техники: пособие для аспирантов / В. З. Черняк. - М.: Кнорус, 2006. - 576 с.
19. Степин, В. С. Философия науки и техники: учебное пособие для вузов / В. С. Степин, В. Г. Горохов, М. А. Розов. – М., 1995.
20. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
21. Петровский, В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учебное пособие для радиотехн. спец. вузов / В.И.Петровский, Ю.Е.Седельников - М.: Радио и связь, 1986. - 215 с.
22. Малков, Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб.пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2007. – 88 с.
23. Экранирование в конструкциях РЭС: Метод.указ. / сост.: Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2007. – 16 с
24. Защита от радиопомех. Под ред. Максимова М.В. М.: Сов.радио, 1976. – 496 с.
25. Вартанесян, В.А. Радиоэлектронная разведка.- М.:Воениздат,1991. – 254 с.
26. Палий, Л.И. Радиоэлектронная борьба.-М.: Воениздат, 1989. – 350с.
27. Бадалов, А.Л. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС / А. Л. Бадалов, А. С. Михайлов. - М.: Радио и связь, 1990. - 271 с.
28. Костромина, Н.В. Электромагнитная совместимость в конструкциях РЭА (ЭВА): учеб.пособие / Н. В. Костромина, Е. П. Павлов; Марийский политехн. ин-т им. А. М. Горького. - Йошкар-Ола, 1989. - 145с.
29. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. - М.: Радио и связь, 1989. - 223с.
30. Громзин, М.М. Работоспособность радиосредств при наличии помех:(Теория и практика). Ч.3 : Помехозащищенность радиосредств. - М., 1995. - 112с.
31. Гурвич, И.С. Защита ЭВМ от внешних помех. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 224 с.