

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

***ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ***

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплине
«Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств»
для студентов радиотехнических специальностей всех форм обучения

Минск БГУИР 2010

УДК 621.396.6:621.391.827(076)
ББК 32.844 + 32.811.7я73
И88

С о с т а в и т е л и :
В. Г. Устименко, Е. Н. Каленкович, В. А. Кашко

И88 **Исследование** статистических параметров электромагнитной обстановки : метод. указания к лаб. работе по дисц. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» для студ. радиотехн. спец. всех форм обуч. / сост. В. Г. Устименко, Е. Н. Каленкович, В. А. Кашко. – Минск : БГУИР, 2010. – 24 с. : ил.

В методических указаниях кратко изложены основные положения статистической теории ЭМС радиоэлектронных средств. Рассмотрены методы статистической оценки параметров непреднамеренных радиопомех (НРП) с помощью математической статистики. Изложены сведения, связанные с принципами построения измерителей радиопомех и измерений статистических характеристик НРП. Даются рекомендации по выполнению лабораторной работы, требования к содержанию отчета и контрольные вопросы.

Для студентов БГУИР, обучающихся по специальностям «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы», «Радиоинформатика» и «Радиоэлектронная защита информации».

УДК 621.396.6:621.391.827(076)
ББК 32.844 + 32.811.7я73

© Устименко В. Г., Каленкович Е. Н., Кашко В. А.,
составление, 2010
© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	4
1. Краткие теоретические сведения.....	4
2. Определение плотности распределения и параметров случайных величин.....	13
3. Измерение параметров непреднамеренных помех.....	17
3.1. Общие сведения об измерении параметров помех.....	17
3.2. Многофункциональный радиоприемник AR5000.....	18
4. Подготовка к работе радиоприемника AR5000 и работа с ним.....	19
5. Задания к лабораторной работе.....	22
6. Содержание отчета.....	23
7. Вопросы для самопроверки.....	24
Литература.....	24

Библиотека БГУИР

Цель лабораторной работы

Исследование статистических характеристик непреднамеренных радиопомех в заданном частотном диапазоне волн и определение на их основе параметров ЭМС электромагнитной обстановки.

1. Краткие теоретические сведения

Радиоэлектронные средства (РЭС) благодаря своей эффективности используются практически во всех сферах человеческой деятельности, причем количество используемых РЭС наращивается быстрыми темпами. Одновременно работающие РЭС могут создавать помехи друг другу. Вероятность мешающего воздействия зависит от числа работающих РЭС и их тактико-технических характеристик (мощность излучения, чувствительность, избирательность и т.д.). Для увеличения плотности размещения одновременно работающих РЭС в пространственно-частотно-временном объеме необходимо тщательное изучение их мешающего взаимодействия.

В реальных условиях в точке расположения РЭС действует большое число различного рода излучений, учет которых возможен только при помощи методов теории вероятности и математической статистики. В дальнейшем мы будем рассматривать только те помехи от РЭС и других источников, которые не создаются специально и называются непреднамеренными радиопомехами (НРП).

Важнейшей характеристикой РПрУ с точки зрения электромагнитной совместимости (ЭМС) является избирательность. Под *избирательностью* понимается способность РПрУ выделять полезный сигнал из сложных электромагнитных полей, созданных в точке расположения РПрУ. Для обеспечения избирательности используют различия полезного сигнала от помех. Наиболее широко используются отличия по частоте, направлению прихода волны, поляризации, времени прихода сигналов и т.д.

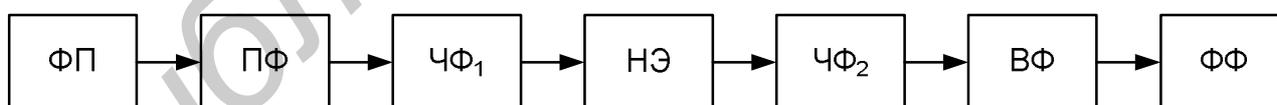


Рис. 1. Модель радиоприемного устройства

Модель приёмника (рис. 1) представляет собой последовательное включение линейных фильтров по различным параметрам: **ФП** – фильтр по пространству, **ПФ** – поляризационный фильтр, **ЧФ₁** – частотный фильтр, характеристика избирательности которого определяется частотной избирательностью антенны, входных цепей и усилителя высокой частоты, **НЭ** – нелинейный элемент, **ЧФ₂** – частотный фильтр, частотная характеристика которого в основном определяется характеристикой фильтра основной селекции (ФОС), **ВФ** – временной фильтр, **ФФ** – фильтр по форме.

Под *электромагнитной обстановкой* (ЭМО) понимается совокупность излучений, образованных за счет совместной работы РЭС и других источников НРП в точке расположения приемного устройства рассматриваемой радиотехнической системы.

Можно отметить исключительное многообразие частотно-время-пространственных характеристик помех и многочисленность источников. Знание индивидуальных свойств каждого из них необходимо для оценки действия помех на радиосредства, расположенные в непосредственной близости от источника, и для разработки эффективных мер защиты.

Для решения задач ЭМС необходимо составить модель ЭМО, позволяющую выявлять закономерности взаимного влияния совместно работающих РЭС.

Естественно, что модель – это лишь приблизительная копия, отражающая наиболее существенные особенности ЭМО. Для составления модели надо знать ряд факторов: относительное расположение источников мешающего излучения; энергетические характеристики мешающих сигналов; параметры помех, определенные в интересующих нас диапазонах; число источников, создающих радиопомехи. Такая модель необходима для возможности количественно оценить ухудшение тактико-технических характеристик исследуемой РТС. Изобразим модель территориального расположения РЭС.

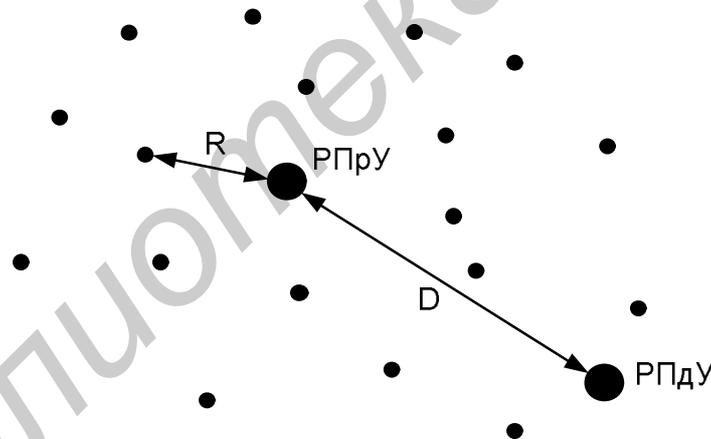


Рис. 2. Территориальная модель ЭМО

Территориальная модель ЭМО (рис. 2) состоит из передатчика (РПДУ) и приемника (РПрУ), которые разнесены на расстояние D , близкое к максимальному для исследуемой РТС. Таким образом, приемное устройство принимает полезный сигнал на фоне N излучений от других РЭС, которые в данном случае являются мешающими. Приёмник должен выделить полезный сигнал из всей совокупности излучений. Основой для такого выделения служит отличие параметров сигнала от параметров помех.

Целесообразно все параметры сигналов разделить на энергетические и неэнергетические. К неэнергетическим параметрам относятся несущая частота, направление прихода по азимуту и углу места, временные характеристики,

поляризация. Энергетическими параметрами считают энергию сигнала, плотность потока мощности, напряженность поля, мощность, силу тока, напряжение и т.д.

Любой радиосигнал можно представить набором параметров x_1, x_2, \dots, x_n , каждый из которых принимает значения в соответствующих диапазонах Dx_1, Dx_2, \dots, Dx_n . Таким образом, каждый сигнал можно представить в виде точки внутри некоторого n -мерного прямоугольного параллелепипеда со сторонами Dx_1, Dx_2, \dots, Dx_n , координаты которой будут определяться параметрами x_1, x_2, \dots, x_n . Если в зоне досягаемости исследуемого приёмника действует N источников излучения, то внутри такого параллелепипеда будет N точек.

Координаты каждой точки будут случайны, а плотность заполнения неравномерна и будет описываться n -мерной плотностью распределения $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ параметров x_1, x_2, \dots, x_n .

Для большинства практических случаев параметры x_1, x_2, \dots, x_n независимы друг от друга, что объясняется двумя основными факторами:

- неэнергетические параметры независимы по своей физической природе и методу формирования;

- диапазоны изменения параметров считаются узкими, т.е. $Dx \ll x$, а для независимых параметров n -мерную плотность распределения параметров можно представить как произведение одномерных плотностей по отдельным параметрам: $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega(x_1) \cdot \omega(x_2) \cdot \dots \cdot \omega(x_n)$.

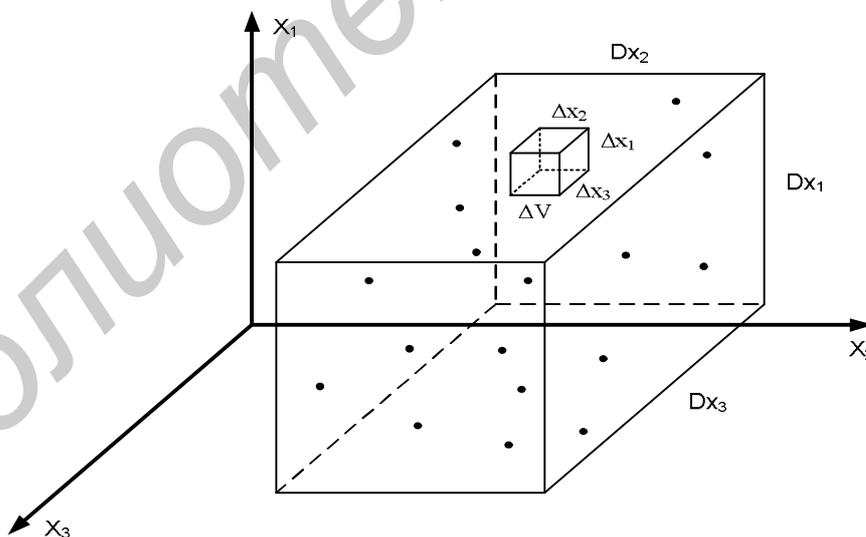


Рис. 3. Распределение случайных точек в n -мерном параллелепипеде

В рассматриваемом n -мерном параллелепипеде (рис. 3), общий объём которого

$$V = Dx_1 \cdot Dx_2 \cdot \dots \cdot Dx_n = \prod_{i=1}^n Dx_i, \quad (1)$$

можно выделить относительно малый объём $DV' \ll V$, охватывающий точку $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, с ребрами, параллельными осям координат. По каждой из осей этот объём будет занимать отрезок DX'_i , а сам объём

$$DV' = DX'_1 \cdot DX'_2 \cdot \dots \cdot DX'_n = \prod_{i=1}^n DX'_i \quad (2)$$

можно представить как обобщенную полосу пропускания n -мерного фильтра, состоящего из n фильтров по отдельным параметрам с полосой пропускания DX_i . Будем считать, что все фильтры идеальные, т.е. имеют прямоугольную характеристику избирательности. Таким образом, в обобщенном объёме V , заполненном системой случайных точек с распределением $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$, с помощью n -мерного фильтра выделена обобщенная полоса прозрачности.

Среднее число сигналов N_{cp} , попадающих в обобщенную полосу пропускания, можно определить по формуле

$$N_{cp} = N \cdot \Delta V' \cdot \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) = N \cdot \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i). \quad (3)$$

Для обобщенной полосы пропускания можно применить распределение Пуассона:

$$V_k = \frac{1}{k!} e^{-z} z^k, \quad (4)$$

где V_k – вероятность того, что событие А, вероятность появления которого равна p , в n опытах появиться ровно k раз, $z = n \cdot p$.

В нашем случае под событием А подразумевается попадание помехи в обобщенную полосу прозрачности, тогда z – среднее число сигналов в объёме DV' , т.е. $z = N_{cp}$.

Распишем данную формулу:

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{1}{k!} \exp(-N \cdot \Delta V' \cdot \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)) \times (N \cdot \Delta V' \cdot \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n))^k = \\ &= \frac{1}{k!} \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i))^k. \end{aligned} \quad (5)$$

С помощью данного выражения можно найти ряд важных вероятностей:

– вероятность того, что в объёме DV' не будет ни одного излучения

$$V_0 = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i)); \quad (6)$$

– вероятность того, что в объёме DV' будет только одно излучение

$$V_1 = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i)) \cdot (N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i)); \quad (7)$$

– вероятности того, что в объёме DV' будет не более одного излучения

$$V_{\leq 1} = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i)) \cdot (1 + N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \cdot \omega(x'_i)). \quad (8)$$

По смыслу V_0 характеризует ЭМС системы в целом и называется *вероятностью ЭМС*. Ее значение зависит от ЭМО, параметров РПУ и эффективности мешающего воздействия помех на полезный сигнал, а следовательно, на возможность выполнения РТС своих функций.

Эта вероятность характеризует отсутствие помех на выходе приемника, в котором нет полезного сигнала, и позволяет исключить из рассмотрения отношение сигнал/шум, что существенно упрощает методику исследования.

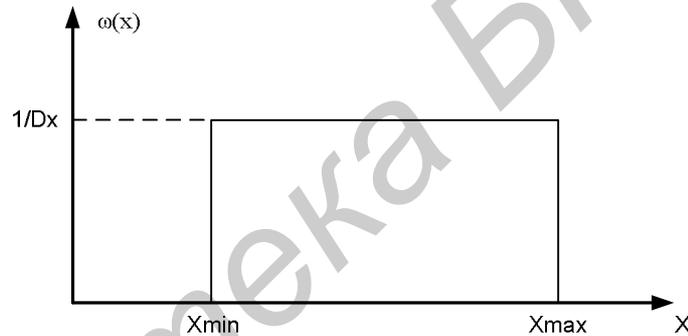


Рис. 4. Равномерный закон распределения

Как правило, распределение неэнергетических параметров внутри их диапазонов изменения можно описать равномерным законом $\omega_n(x) = 1/Dx$ (рис. 4), при этом формула для V_0 существенно упростится:

$$V_0 = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i / Dx_i); \quad (9)$$

если селекция проводится только по одному параметру, то

$$V_0 = \exp(-N \cdot \Delta X' / Dx). \quad (10)$$

Описание плотности распределения энергетических параметров нельзя свести только к равномерному закону, это может быть частным случаем, причем довольно редким. Ограничим рассмотрение этого вопроса ситуацией, когда помеха РПРУ наводится одним источником со случайным местоположением.

Для плотности потока мощности в точке приёма известно выражение

$$\Pi = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{изл}} y(\varphi, \varepsilon)}{4\pi R^2}, \quad (11)$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения, $G_{\text{изл}}$ – КНД излучающей антенны, $y(\varphi, \varepsilon)$ – нормированная, снятая по мощности ДН передающей антенны.

Перепишем данную формулу в следующем виде: $\Pi = AP_3/R^2$, где $P_3 = P_{\text{изл}} G_{\text{изл}} y(\varphi, \varepsilon)$ – эквивалентная мощность излучения источника, $A = 1/4\pi$. Более кратко запишем $\Pi = xy$, где $x = AP_3$, $y = 1/R^2$.

Для нахождения распределения $\omega(\Pi)$ надо знать распределения $\omega(x)$ и $\omega(y)$. Рассмотрим два упрощенных случая.

Случай 1. Предположим, что все источники излучений имеют одинаковую эквивалентную мощность ($P_3 = \text{const}$) и распределены равномерно (рис. 5) в плоском кольце, ограниченном радиусами R_{max} и R_{min} . Найдём для данного случая распределение $\omega(R)$. Площадь кольца $\delta S = 2\pi R_1 \delta R$. Среднее число источников на этой площади $DN = 2\pi r R_1 \delta R$, где r – плотность источников излучения. Если весь интервал $D_R = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$ разбить на равные части, число которых $h = D_R/(\delta R)$, то плотность вероятностей найдем как предел $\omega(R) = \lim_{\delta R \rightarrow 0} (DN/(\delta R)) = \beta R$, где β – нормирующий множитель.

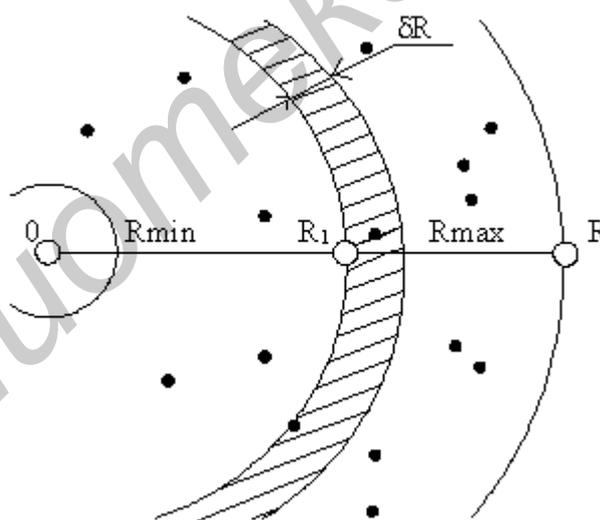


Рис. 5. Равномерное по площади расположение источников помех

После нормировки получим

$$\omega(R) = 2R/(R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2) \quad (R_{\text{min}} \leq R \leq R_{\text{max}}).$$

Зная $\omega(R)$, нетрудно рассчитать $\omega(\Pi)$ по формуле, известной из теории вероятностей:

$$\omega(\Pi) = \beta_1 \omega(R) / \left| \frac{d\Pi}{dR} \right|. \quad (12)$$

Определив производную $d\Pi/dR = \beta_2/R^2$ (β_1, β_2 постоянные коэффициенты) и проведя соответствующие подстановки и преобразования, получим:

$$\omega(\Pi) = \frac{\Pi_{\max} \Pi_{\min}}{\Pi_{\max} - \Pi_{\min}} \cdot \frac{1}{\Pi^2} \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}). \quad (13)$$

Как правило $\Pi_{\max} \gg \Pi_{\min}$, тогда

$$\omega(\Pi) = \Pi_{\min}/\Pi^2 \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}). \quad (14)$$

Нас в основном будет интересовать распределение мощности

$$\omega(P) = \frac{P_{\max} P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \cdot \frac{1}{P^2} \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}). \quad (15)$$

Случай 2. Предположим, что все источники излучения находятся на одинаковой дальности, тогда плотность распределения дальностей будет описываться дельта-функцией $\omega(R) = \delta(R - R_{\text{cp}})$ ($R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$). Таким образом, $\omega(\Pi)$ будет зависеть от распределения $\omega(P_3)$. Эквивалентная мощность относится к величинам с большим динамическим диапазоном, для которых часто постулируют равномерно-логарифмическое распределение или распределение Шеннона:

$$\omega(\Pi) = \frac{1}{\Pi \cdot \ln(\Pi_{\max}/\Pi_{\min})} \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}). \quad (16)$$

Для мощности сигнала запишем

$$\omega(P) = \frac{1}{P \cdot \ln(P_{\max}/P_{\min})} \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}). \quad (17)$$

В общем случае, применяя формулу $\Pi = xy$, при известных $\omega(x)$ и $\omega(y)$ можно воспользоваться известным выражением

$$\omega(y) = \int_0^{\infty} \omega(x) \cdot \omega(y/x) \cdot \frac{dx}{|x|}. \quad (18)$$

Мы рассмотрели два случая распределения мощности сигналов $\omega(P)$ в зависимости от распределения дальностей $\omega(R)$ и в обоих случаях получили, что распределение мощности описывается гиперболическим законом только с

разными показателями степени. В общем виде гиперболический закон распределения для мощностей записывается следующим образом:

$$\omega(P) = \beta / P^m \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}), \quad (19)$$

где β – нормировочный коэффициент,

$$\beta = \begin{cases} \frac{(m-1)P_{\max}^{m-1}P_{\min}^{m-1}}{P_{\max}^{m-1} - P_{\min}^{m-1}} & (m \neq 1) \\ \frac{1}{\ln(P_{\max}/P_{\min})} & (m = 1) \end{cases} . \quad (20)$$

Нормировочный коэффициент β рассчитывается из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) dx = 1 . \quad (21)$$

Гиперболический закон является трехпараметрическим, его параметрами являются P_{\max} , P_{\min} и степень m (рис. 6).

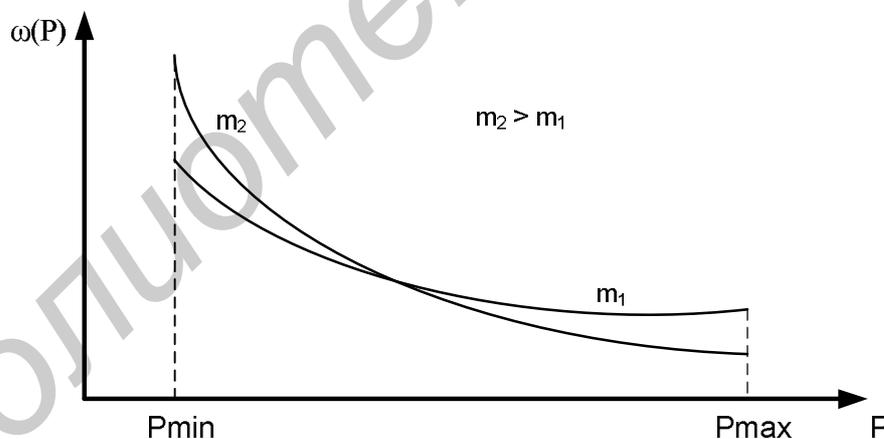


Рис. 6. Гиперболический закон распределения при различных значениях m

Понятно, что кроме гиперболического закона распределения могут применяться и другие. Все зависит от конкретной ситуации.

Энергетическую оценку ЭМС следует увязывать с отношением сигнал/помеха, от которого зависят большинство ТТХ системы. В реальных условиях на РПрУ воздействуют различного рода помехи, отличающиеся по своим временным, спектральным и другим характеристикам, влияние которых на РПрУ при одинаковых мощностях различно. Для устранения этого многообразия помех в исходных моделях ЭМО в [2] вводится понятие

шумового эквивалента. Под *шумовым эквивалентом непреднамеренной помехи* понимается отношение реальной мощности данной помехи к мощности «белого» шума, попадающего в полосу РПДУ, при котором их влияние на тактико-технические характеристики РТС одинаково, т. е. $P_p = \eta P_{ш}$. P_p – реальная мощность помехи, $P_{ш}$ – мощность шума, вызывающего такое же воздействие, как и непреднамеренная помеха, мощностью P_p . Тогда шумовой эквивалент $\eta = P_p/P_{ш}$. Таким образом, под мощностью помехи мы подразумеваем не ее реальную мощность, а эквивалентную. Общую мощность помех на входе приемника можно определить как сумму:

$$P_{п} = P_{ш} + P_{м.с}, \quad (22)$$

где $P_{ш}$ – мощность собственных шумов, $P_{м.с}$ – мощность мешающих сигналов.

Первое слагаемое в этой формуле является величиной детерминированной, т.е. в приемнике всегда имеются шумы, уровень которых практически не изменяется. Значение второго слагаемого величина случайная, она может во много раз превышать уровень собственных шумов и приводить к частичной либо полной потере работоспособности системы, однако вероятность такого события, как правило, мала. Для нормальной работы приемника мощность полезного сигнала должна в какое-то число раз a превышать мощность собственных шумов $P_0 = aP_{ш}$, а в условиях действия помех в a раз превышать суммарную мощность помех:

$$P'_0 = a \cdot (P_{ш} + P_{м.с}) = P_0 + a P_{м.с}. \quad (23)$$

Коэффициентом непреднамеренных помех называется число $K_{нп}$, которое показывает, во сколько раз в среднем надо повысить порог приема в условиях воздействия непреднамеренных помех, чтобы сохранить превышение порогового уровня сигнала над помехой таким же, каким оно было до воздействия непреднамеренных помех. Исходя из определения получаем

$$K_{нп} = P'_0/P_0 = 1 + P_{м.с}/P_{ш}. \quad (24)$$

С учетом электромагнитной обстановки и селективных свойств приемника получим

$$K_{нп} = 1 + N \cdot \frac{P_{ср}}{P_{ш}} \prod_{i=1}^n \Delta X_i \cdot \omega(x'_i) . \quad (25)$$

Как видно из формулы, коэффициент непреднамеренных помех определяется не только параметрами приемника, в данном случае мощностью собственных шумов $P_{ш}$ и полосы пропускания по отдельным параметрам ΔX_i , а также параметрами ЭМО, средней мощностью помех $P_{ср}$ и плотностью распределения вероятности их неэнергетических параметров $\omega(x_i)$. Чем

меньшее влияние оказывают помехи на работу РТС, тем меньше $K_{\text{нп}}$, поэтому меры по снижению $K_{\text{нп}}$ являются мерами улучшения ЭМС.

2. Определение плотности распределения и параметров случайных величин

Математическая статистика – раздел математики, посвященный установлению закономерностей случайных явлений или процессов на основании регистрации, систематизации и обработки результатов наблюдений или измерений [5].

Статистические методы исследования, базирующиеся на рассмотрении экспериментальных данных о тех или иных совокупностях объектов, применяются в самых различных областях знаний (физика, экономика, медицина и др.) и могут преследовать разные цели. Однако можно указать следующие три основные задачи математической статистики:

- § оценка неизвестной функции распределения или плотности вероятности. Эта задача обычно формулируется так. В результате независимых измерений случайной величины x получены следующие ее конкретные значения: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Требуется оценить неизвестную функцию распределения $F(x)$ случайной величины x или ее плотность вероятности $\omega(x)$, если x – непрерывная случайная величина. Эту задачу можно распространить на многомерные функции распределения и плотности вероятности;
- § оценка неизвестных параметров закона распределения. Пусть на основании физических или общетеоретических соображений можно заключить, что случайная величина x имеет функцию распределения определенного вида, зависящую от нескольких параметров, значения которых неизвестны. На основании наблюдений величины x нужно оценить значения этих параметров;
- § статистическая проверка гипотез. Обычно эта задача формулируется следующим образом. Пусть на основании некоторых соображений можно считать, что функция распределения исследуемой случайной величины x есть $F(x)$. Спрашивается, совместимы ли наблюдаемые значения с гипотезой, что случайная величина x действительно имеет распределение $F(x)$.

Чтобы получить представление о распределении наблюдений, поступают следующим образом. На первом этапе производят многократное измерение случайной величины, получая простой статистический ряд (табл. 1).

Таблица 1

i – номер измерения	1	2	3	.....	r
Результат измерения	x_1	x_2	x_3	.....	x_r

Однако статистический материал в виде простого статистического ряда при большом числе измерений труднообозрим, по нему практически невозможно оценить закон распределения исследуемого параметра x .

Поэтому для визуальной оценки закона распределения исследуемой случайной величины x производят группировку данных.

Область экспериментальных значений случайной величины разбивают на r обычно одинаковых интервалов длиной Δx и вычисляют частоту попадания случайной величины x в i -й интервал. В результате получаем сгруппированный статистический ряд следующего вида (табл. 2).

Таблица 2

Dx_i интервал	Δx_1	Δx_2	Δx_3	.....	Δx_r
Частость $n_i = \frac{k_i}{r}$	n_1	n_2	n_3	.....	n_r

Частость в данном случае характеризует вероятность попадания случайной величины x в i -й интервал.

Используя данные табл. 2, можно определить все числовые характеристики случайной величины, наиболее важными из которых являются математическое ожидание (среднестатистическое значение) и дисперсия:

$$m_x = \sum_{i=1}^r x_i \cdot v_i, \quad (26)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^r (x_i - m_x)^2 \cdot v_i, \quad (27)$$

где x_i – значение случайной величины, соответствующее середине i -го интервала.

Относительная плотность точек в каждом интервале определяется как отношение частоты попадания в этот интервал v к его длине Dx (табл. 3):

$$p_i = \frac{n_i}{Dx} = \frac{k_i}{r \cdot Dx}, \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (28)$$

где k_i – число экспериментальных точек в i -м интервале, $v_i = k_i/r$.

Таблица 3

Dx_i интервал	Δx_1	Δx_2	Δx_3	.....	Δx_r
Плотность $p_i = \frac{v_i}{\Delta x}$	p_1	p_2	p_3	.....	p_r

Подсчитанные таким образом значения можно представить графически в виде ступенчатой кривой: по оси абсцисс откладывают соответствующие интервалы и на основании каждого из них строится прямоугольник, высота которого равна относительной плотности p_i . Полученная ступенчатая кривая называется гистограммой. Гистограмма частот статистического ряда представлена на рис. 7.

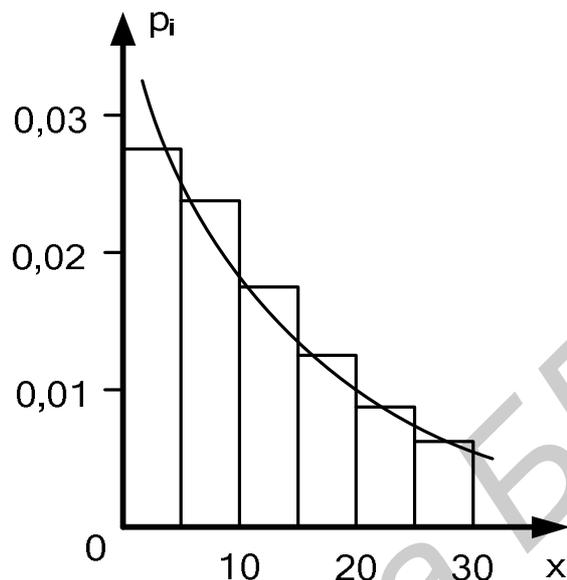


Рис. 7. Гистограмма частот статистического ряда

Гистограмма дает наглядное представление о распределении наблюдаемых значений на числовой оси. По ней можно определить частоту попадания наблюдаемых значений в любой интервал числовой оси. Очевидно, что все величины p_i неотрицательны, причем суммарная площадь под гистограммой равна единице:

$$\sum_{i=1}^r p_i \Delta x = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r k_i = 1. \quad (29)$$

При заданном числе наблюдений r гистограмма, составленная на основе группировки с достаточно малыми интервалами, обычно многовершинная и не отражает наглядно существенных свойств распределения. С другой стороны, группировка по слишком крупным интервалам может привести к потере ясного представления о характере распределения и к грубым ошибкам при вычислении других характеристик распределения.

Для выбора оптимальной длины интервалов, т.е. такой длины частичных интервалов, при которой статистический ряд не будет очень громоздким и в нем не исчезнут особенности исследуемой случайной величины, рекомендуется формула

$$\Delta x = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,2 \cdot \ln r}, \quad (30)$$

где r – объем выборки, Δx – длина интервала.

Количество интервалов выбирается, как правило, не меньше 5 и не больше 15.

Аналогично строится гистограмма в двумерном случае, когда рассматривается распределение данных на плоскости (например, при анализе рассеивания при стрельбе или бомбометании). Разбив часть плоскости, занятую экспериментальными точками, на прямоугольники и подсчитав число точек в каждом прямоугольнике, можно определить соответствующие относительные плотности точек как отношение частоты попадания в прямоугольник к его площади.

Во многих случаях возникает необходимость аппроксимации экспериментально полученной гистограммы подходящим аналитическим выражением, представляющим собой некоторый теоретический закон распределения или плотность вероятности, которые должны удовлетворять двум обязательным условиям: неотрицательности и нормировки. Эта операция называется выравниванием статистических данных. При этом естественно стремятся к тому, чтобы такая аппроксимация (выравнивание) в определенном смысле была наилучшей.

Имеется много разнообразных способов и приемов подбора распределений для экспериментальных данных и невозможно выделить какой-либо из них. Успех в значительной степени определяется накопившимся опытом в этом деле. Однако можно дать некоторые общие рекомендации.

Обычно аппроксимация гистограммы является не самоцелью, а производится для получения каких-либо выводов о физическом механизме изучаемого явления или процесса или же для выполнения последующих расчетов. Исходя из этого прежде всего необходимо принять решение – как аппроксимировать гистограмму: дискретным или непрерывным распределением (плотностью вероятности). После этого производится качественное сопоставление характера построенной гистограммы с графиком различных теоретических распределений (дискретных или непрерывных) и по близости их поведения останавливаются на каком-либо одном из наиболее подходящих.

В зависимости от решаемой задачи характер и степень близости поведения следует понимать по-разному: иногда можно ограничиться лучшим совпадением в центральной области (области больших вероятностей), а иногда (например в теории обнаружения сигналов) нужно стремиться к лучшему совпадению на «крыльях» закона распределения (в области малых вероятностей).

3. Измерение параметров непреднамеренных помех

3.1. Общие сведения об измерении параметров помех

В состав приборов для измерения параметров радиопомех (в том числе и непреднамеренных) входят: измеритель радиопомех и одно или несколько измерительных устройств, обеспечивающих измерение напряжения, напряженности поля, мощности и тока помех [3]. Измерительными устройствами являются эквиваленты сети и пробники, измерительные антенны, поглощающие клещи и токосъемники.

Измерители радиопомех (ИРП) градуируются в эффективных значениях синусоидального напряжения, выраженных в децибелах относительно 1 мкВ, 1 мкВ/м, или мкА.

В общем виде структурная схема любого измерителя радиопомех (рис. 8) состоит из входного устройства (ВУ), первого аттенюатора (Атт 1), усилителя высокой частоты (УВЧ), преобразователя частоты (ПрЧ), второго аттенюатора (Атт 2), усилителя промежуточной частоты (УПЧ), детектора (Д) квазипикового (пикового) и эффективного значений, вольтметра (В) и окончного устройства (ОУ).

ИРП представляет собой высококачественный измерительный радиоприемник супергетеродинного типа с одним, двумя и более преобразователями частоты.

Входное устройство (ВУ) служит для подключения к источнику радиопомех.

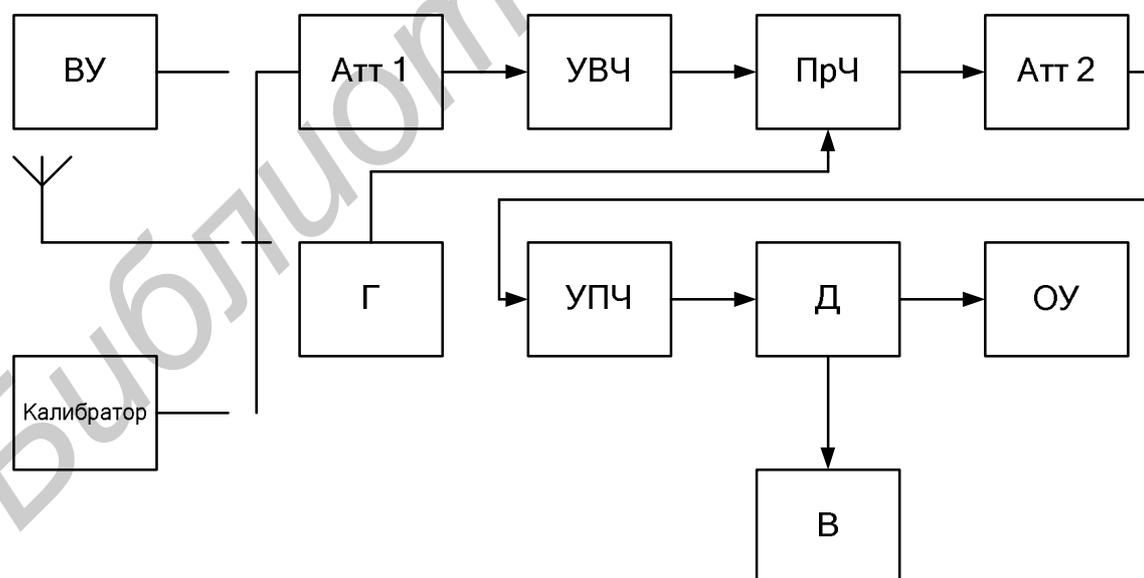


Рис. 8. Структурная схема измерительного приемника

При измерении напряжения радиопомех входным устройством является эквивалент сети или пробник (для измерения напряжения), измерительная антенна (для измерения напряженности поля), поглощающие клещи (для измерения мощности) и токосъемник (для измерения тока).

Измерительный сигнал с ВУ поступает по высокой частоте на аттенюатор Атт1, который служит делителем напряжения и согласующим элементом при подключении к ВЧ-тракту калибратора. Назначение остальных элементов такое же, как и в обычных супергетеродинных приемниках.

Наличие двух делителей сигналов (Атт 1, Атт 2) обусловлено тем, что при делении измеряемого напряжения только по ВЧ неделимыми остаются шумы, возникающие на входе УВЧ, что может привести к дополнительным погрешностям в измерении. При делении напряжения сигнала по ПЧ создается опасность перегрузки каскадов ВЧ, что ведет к нарушению их линейности и недопустимым погрешностям. Поэтому деление напряжения измеряемого сигнала производят по ПЧ (Атт 2), снижая шумы каскадов ВЧ, затем регулируют напряжение аттенюаторами ВЧ (Атт 1), добиваясь работы трактов ВЧ в линейном режиме, а затем вновь регулируют по ПЧ.

3.2. Многофункциональный радиоприемник AR5000

Широкодиапазонный многофункциональный радиоприемник AR5000 предназначен для приема радиосигналов в полосе частот от 10 кГц до 3000 МГц в режимах частотной ЧМ (FM), амплитудной АМ (AM), однополосной модуляции с верхней ВБП (LSB) и нижней НБП (USB) боковой полосой и в телеграфном режиме ТЛГ (CW) (режим немодулированной несущей).

В приемнике применена технология гетеродина на основе цифрового синтезатора частот (Numerically Controlled Oscillator), что обеспечивает высокие показатели технических характеристик и надежности.

AR 5000 имеет следующие технические характеристики:

- диапазон рабочих частот 10 кГц ~ 3000 МГц;
- стабильность частоты (температурная нестабильность $\pm 1,5 \times 10^{-6}$ в диапазоне температур 0 °С...+ 50 °С);
- программируемый шаг перестройки от 1 Гц до 1 МГц;
- промежуточные частоты ПЧ₁ – 622,0 МГц, ПЧ₂ – 10,7 МГц, ПЧ₃ – 455 кГц;
- полоса пропускания фильтров ПЧ: 3 кГц, 6 кГц 15 кГц, 30 кГц, 110 кГц, 220 кГц;
- скорость сканирования – 25 каналов/с (режим CyberScan 45 каналов/с);
- включаемый автоматически или вручную предусилитель или аттенюатор;
- 1000 ячеек памяти в 10 банках. Каждой ячейке памяти и банку памяти можно присвоить имя-комментарий длиной до 8 символов. 20 банков просмотра с автозаписью частот;
- возможность дистанционного управления приемником с ПЭВМ через интерфейс RS-232.

В радиоприемнике для стандартного варианта подключения антенн предусмотрено два гнезда с волновым сопротивлением 50 Ом. Кроме того, к нему могут быть подключены дополнительные антенны при помощи поставляемого отдельно антенного коммутатора. Схема антенного аттенюатора позволяет произвести выбор величины вносимого ослабления из следующих

значений: АВТО, 0 дБ, 10 дБ или 20 дБ. Клавиша управления аттенуатором служит для подключения и отключения схем высокочастотного предварительного усилителя и аттенуатора, влияя тем самым на чувствительность радиоприемника.

Электропитание радиоприемника AR5000 осуществляется от внешнего источника постоянного тока напряжением 12–16 В с нагрузочной способностью около 1 А.

AR5000 выполнен в прочном металлическом корпусе. Органы управления расположены на передней панели приемника, а электрические разъемы – на задней.



Рис. 9. Размещение органов управления приемником на передней панели

4. Подготовка к работе радиоприемника AR5000 и работа с ним

Для подготовки радиоприемника AR5000 к работе необходимо выполнить следующие действия:

1. Подключить блок питания к радиоприемнику и включить его в сеть. На дисплее должны высветиться показания цифровых часов.
2. Убедиться, что радиоприемник подключен к ПЭВМ через интерфейс RS-232. Если нет, то подключить соединительный кабель к свободному COM-порту ПЭВМ.
3. Запустить программу AR5000 на ПЭВМ.

Для управления приемником через интерфейс RS-232 используется специализированная программа. Поскольку программа применяется в учебных целях, то набор её функций ограничен лишь самым необходимым для

выполнения лабораторной работы. Программа призвана упростить настройку и процесс поиска с помощью радиоприемника AR5000.

При первом запуске программы перед вами появится окно с настройкой параметров COM-порта (рис. 10). От пользователя требуется лишь выбрать доступный для работы COM-порт из выпадающего списка. Остальные параметры изменять нет необходимости. Затем нажать «ОК».

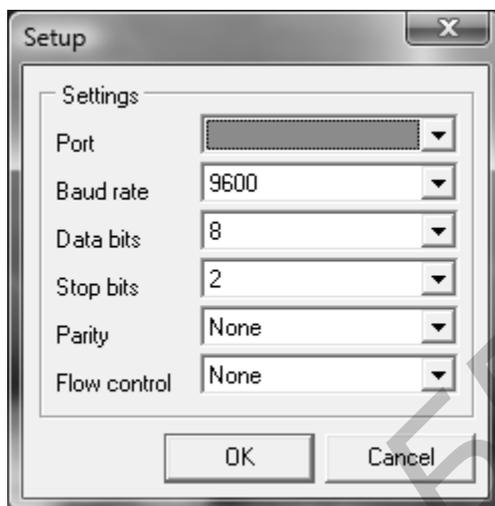


Рис. 10. Окно настройки COM-порта

Главное окно программы (рис.11) состоит из панели для установки параметров сканирования и окна с результатами поиска.

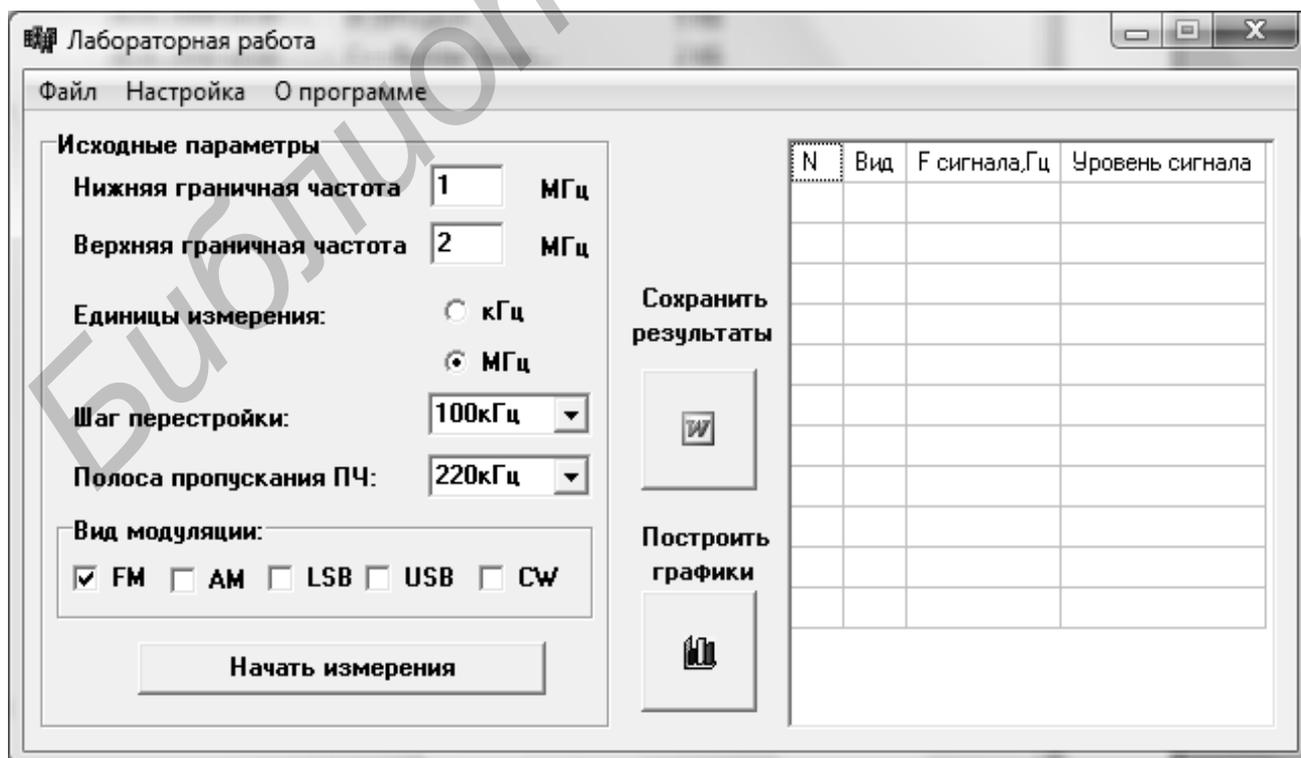


Рис. 11. Главное окно программы

Панель с исходными параметрами сканирования включает в себя ячейки для задания диапазона сканирования, выбора шага перестройки частоты и полосы пропускания ПЧ. Здесь же пользователь должен указать один или несколько видов модуляции сигнала, по которым требуется провести поиск.

В правой части окна программы находится таблица с результатами поиска. Первая колонка – это порядковый номер канала, во второй отображается вид модуляции сигнала, в третьей представлена информация о частоте, в последней указан уровень сигнала.

Для начала поиска необходимо нажать кнопку «Начать измерения». Если все исходные параметры верны (например, нижняя граничная частота должна быть обязательно меньше верхней частоты и т.д.), то радиоприемник автоматически включится и перейдет в режим дистанционного управления, затем начнется процесс поиска сигналов в заданном диапазоне. В случае ошибки в исходных параметрах – появится окно с предупреждением.

ВНИМАНИЕ! Во время поиска программа не будет реагировать на действия пользователя! Необходимо дождаться окончания сканирования диапазона!

После окончания поиска в таблицу результатов будет внесена вся информация о каналах (частоты и т.д.). В этот момент пользователю будет предложено вывести результаты измерений в виде графиков. Если нажать «ОК», то окно программы примет вид, как на рис. 12.

Построенные графики имеют функцию масштабирования поля. Для увеличения масштаба следует нажать левую клавишу и выделить фрагмент поля. Уменьшение масштаба производится обратным способом: нажимаем левую клавишу и перемещаем курсор в обратном направлении.

Поскольку в программе предусмотрена возможность поиска сигналов с несколькими видами модуляции, то графики можно выводить для любого из них. Для этого необходимо воспользоваться фильтром (обозн. 1 на рис. 12).

При построении графиков пользователь может использовать фильтр по уровню. Программа не будет использовать данные о сигнале, уровень которого ниже, чем уровень в ячейке фильтра (обозн. 2 на рис. 12). Для использования фильтра по уровню необходимо ввести в ячейку минимальный уровень сигнала и нажать кнопку «Построить графики» (обозн. 5 на рис. 12) или клавишу «Enter» на клавиатуре.

Для гистограммы частот есть возможность просмотреть таблицу интервалов, которая открывается по нажатию кнопки в правом верхнем углу гистограммы (обозн. 6 на рис. 12).

В случае необходимости повторного измерения или проведения поиска с другими исходными параметрами используется кнопка «Повторить измерения» (обозн. 3 на рис. 12). При этом все данные, полученные в предыдущих измерениях, будут удалены.

Результаты работы можно сохранить в файле MS Word. Для этого необходимо нажать кнопку «Сохранить результаты» (обозн. 4 на рис. 12).

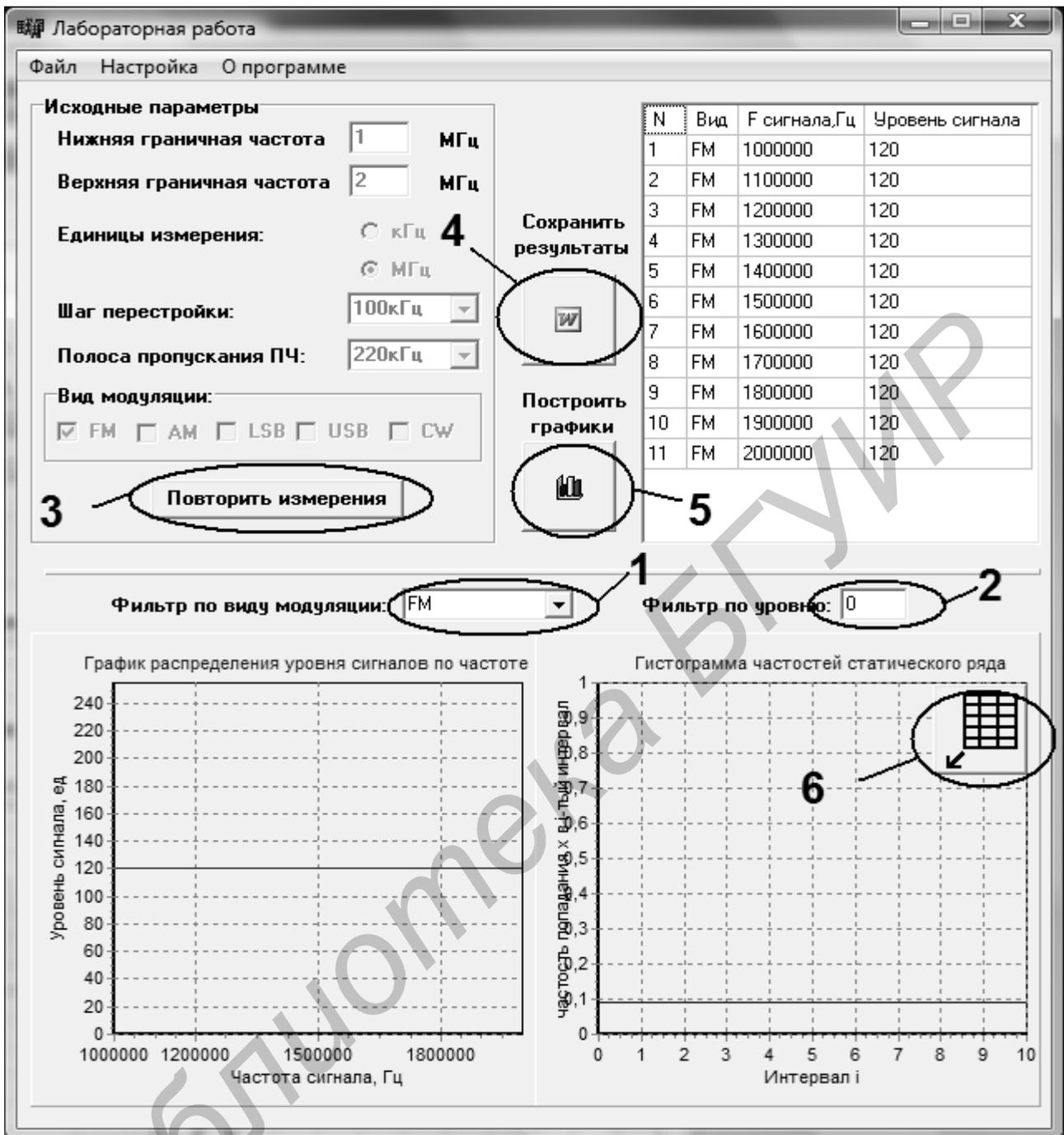


Рис. 12. Главное окно программы с результатами измерений и графиками

5. Задания к лабораторной работе

Задание 1. Подготовить радиоприемник AR5000 к работе, согласно п. 4.

Задание 2. Провести поиск и измерение уровня сигналов в указанном преподавателем диапазоне. Результаты измерений оформить в виде табл. 5.

Общие указания

Для выполнения измерений необходимо задать диапазон, шаг перестройки частоты, полосу пропускания фильтра ПЧ и вид модуляции. Нажать кнопку «Начать измерения» в окне программы.

После измерений значение частоты сигнала (помехи) f_i и ее уровня записывается в табл. 5.

Таблица 5

№ измерения	Частота НРП, кГц (МГц)	Уровень сигнала, дБ
1	0,9	12
2	1,1	23
...
85	1,83	4
...
90	1,97	9

Задание 3. По результатам измерений построить гистограммы частотей напряжений и частот НРП.

Задание 4. Пользуясь результатами измерений, методами математической статистики и методическими указаниями к данному разделу:

- 1) определить P_{\min} , $P_{\text{ср}}$, P_{\max} .
- 2) рассчитать вероятность ЭМС V_0 с учетом числа N мешающих сигналов, проникающих на выход приемника по основному каналу без учета нелинейных явлений;
- 3) определить коэффициент непреднамеренных помех $K_{\text{н.п.}}$.

6. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

1. Таблицу измерений напряжений НРП (табл. 5).
2. Интервальный статистический ряд.
3. Гистограммы частотей напряжений и частот для диапазона частот, в котором проводились измерения.
4. Значения P_{\min} , $P_{\text{ср}}$, P_{\max} .
5. Расчеты и результаты расчетов вероятностей ЭМС V_0 .
6. Выводы.

7. Вопросы для самопроверки

1. Чем оценивается ЭМО в точке расположения рецептора НРП?
2. Что такое неэнергетические и энергетические параметры селекции НРП?
3. Характеристика законов распределения неэнергетических параметров.
4. Характеристика законов распределения мощности НРП.
5. Определение вероятности обеспечения ЭМС.
6. Определение коэффициента непреднамеренных помех $K_{н.п.}$.
7. Понятие о шумовых эквивалентах.
8. Принципы обработки статистических данных.
9. Свойства и порядок построения гистограммы частот случайных величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистическая оценка воздействия непреднамеренных помех на рецепторы: метод. руководство к лаб. работе по курсу «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» / сост. Е. В. Кереселидзе. – Минск : БГУИР, 2003. – 24 с.
2. Апович, А. Ф. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учеб. пособие / А. Ф. Апович. – Минск : Бестпринт, 2003. – 308 с.
3. Михайлов, А. С. Измерение параметров ЭМС РЭС / А. С. Михайлов. – М.: Связь, 1980. – 200 с.
4. Герасимович, А. И. Математическая статистика / А. И. Герасимович, Я. И. Матвеева. – Минск : Выш. шк., 1978. – 200 с.
5. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплине
«Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств»
для студентов радиотехнических специальностей всех форм обучения

Составители:
Устименко Виктор Григорьевич
Каленкович Евгений Николаевич
Кашко Виталий Анатольевич

Редактор Т. Н. Крюкова
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 05.01.2010.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 100 экз.	Заказ 203.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6