УДК 621.382.08

И.Г. Леонов[1], В.В. Сидоров[1], Р.Н. Животовский[2]

[1] *Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*
[2] *в/ч А2860*

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЯ-ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ РЛС АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЮ

Предлагается метод измерения время-фазо-частотных характеристик широкополосных радиоприемных трактов современных РЛС. Рассматриваются аппаратно-программный комплекс допускового контроля и пути повышения точности измерения за счет использования косвенных статистических методов. Приводятся результаты испытаний измерительного комплекса.

Ключевые слова: *широкополосный радиоприемный тракт, РЛС, измерительный комплекс.*

Введение

Во всех современных РЛС используются как правило когерентные зондирующие сигналы и когерентная обработка отраженных эхо-сигналов. При этом очень важной становится задача обеспечения когерентности сигналов не только на этапе их формирования, но и в процессе канализации, излучения, распространения, приема и обработки. И если разрушение когерентности сигналов в ходе распространения и отражения от воздушных целей есть процесс объективный, определяемый только свойствами среды и целей, то степень сохранение когерентности сигналов на этапах приема и обработки

© И.Г. Леонов, В.В. Сидоров, Р.Н. Животовский

всегда является следствием качества приемных устройств и совершенства алгоритмов обработки.

Основной причиной разрушения когерентности сигналов в процессе приема является нелинейность характеристик приемных трактов РЛС. Одним из методов устранения влияния нелинейности характеристик приемных трактов на когерентность сигналов есть введение «предискажений» в структуру зондирующего сигнала. Для этого необходимо измерять характеристики радиоприемного канала. И если вопросы измерения амплитудных, временных, амплитудо-частотных характеристик исследованы достаточно хорошо, то измерения время-фазо-частотных характеристик радиоприемных трактов широкополосных сигналов является сложно реализуемой технической задачей и до настоящего времени недостаточно исследованной.

Цель статьи – рассмотреть пути повышения точности измерения за счет использования косвенных статистических методов и разработать метод измерения время-фазо-частотных характеристик широкополосных радиоприемных трактов современных РЛС.

Особенности статистического подхода к измерению параметров сигнала

В процессе прохождения сигнала u(t) по радиолокационному каналу он трансформируется, в зависимости от особенностей этого канала. Для анализа оценки влияния воздействия обычно предполагают, что выходной сигнал есть продукт преобразования идеального (без искажений) сигнала $u_{ид}(t)$ при прохождении его через некий тракт А с импульсной характеристикой К(t) на который, в общем случае, воздействуют аддитивные и мультипликативные помехи. При этом на выходе приемника возникают ошибки оцениваемого параметра ΔK_B. Непосредственное вычисление ΔK_B сложно реализуемо. Потому часто оценивают величины с ней функционально связанные: ошибки квантования ΔU, дискретизации $\Delta f_Г$, вычисления центральной частоты δf, шумы питающих напряжений $\Delta U_п$, ошибки восстановления, ошибки вычисления частоты δf, девиации частоты $\delta\Delta f$, нестабильность начальной фазы $\delta\phi_0$, длительности радиоимпульса $\delta\tau_и$ и др. Таким образом, исследуемый тракт преобразует идеальный сигнал $u_{ид}(t)$ в соответствии с некоторым оператором А

$$u_c(t) = A\{ u_{ид}(t),\Delta K(t),\Delta T(t),\Delta f(t)\}, \qquad (1)$$

где $\Delta K(t)$ – функция, характеризующая нестабильности параметров импульсной характеристики функциональных узлов, $\Delta T(t)$, $\Delta f(t)$ – функции, характеризующие искажения временных и частотных параметров во времени.

Статистическую оценку отличия восстановленного сигнала $u_c(t)$ от идеального $u_{ид}(t)$, обычно проводят путем сравнения нормированных автокорреляционной функции (АКФ) идеального сигнала и взаимнокорреляционной функции (ВКФ) искаженного и идеального сигналов

$$\rho_B(\tau) = \frac{1}{E}\int_{-\infty}^{\infty} u_c(t-\tau)u^*_{ÈÄ}(t)dt = \frac{1}{E}\times$$
$$\times\int_{-\infty}^{\infty}\left[u_c(t-\tau)+\Delta u(t-\tau)\right]u^*_{ÈÄ}(t)dt = \rho_A(\tau)+\Delta\rho(\tau), \qquad (2)$$

где $\Delta\rho(\tau)$ – разность между ВКФ и АКФ, а энергия идеального сигнала $Å = \int_0^{\tau_c}|u_з(t)|^2dt = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|G_з(\omega)|^2d\omega$.

Функция $\Delta\rho(\tau)$ или ее дискретное представление $\Delta\rho(i)$ может быть принята за интегральный показатель точности восстановления сигналов. При этом для количественной оценки искажений обычно используют среднеквадратическую ошибку (СКО) [3]:

$$\varepsilon^2_{\Delta\rho} = \frac{1}{N}\sum_i\left(\Delta\rho(^з)\right)^2. \qquad (3)$$

На практике необходимо знать не конкретные параметры сигналов, а то, не выходит ли они за допуск: то есть необходимо проводить допусковый контроль. Статистический подход позволяет оперативно ответить на данный вопрос.

Причины ошибки восстановления в первом приближении можно считать некоррелированными друг с другом [4], поэтому возможен расчет величины (3) отдельно для каждого из составляющих функции А. Однако для этого необходимо знать законы функции плотности распределения вероятности каждого из составляющих (1). Поэтому существуют необходимость в разработке устройств, позволяющих оценивать или получать эту информацию.

Существующие аппаратно-программные средства чаще всего направлены на измерения амплитудо-частотного и фазо-частотного спектра восстановленного сигнала и его временной структуры и не позволяют оценивать время-частотные параметры, которые крайне важны при анализе трактов обработки частотно-модулированных сигналов (частотно-манипулированных).

Описание аппаратно-программного измерительного комплекса

Разработан аппаратно-программный измерительный комплекс допускового контроля приемных трактов РЛС. Структурная схема комплекса представлена на рис. 1.

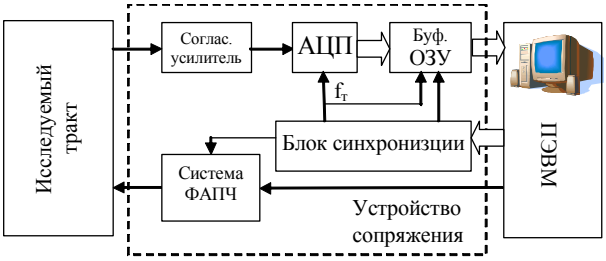

Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Предлагаемый измерительный комплекс состоит из аппаратной и программной части (рис. 1). Аппаратная часть (штриховая линия на рис. 1) предназначена для переноса опорного сигнала в заданный диапазон частот и преобразование аналогового сигнала (прошедшего исследуемый тракт) в цифровой с записью его в ЭВМ. Она состоит из согласующего усилителя, АЦП, буферного ОЗУ, блока синхронизации и фазового модулятора. Программная часть измерительного комплекса реализована с использованием объектно-ориентированного языка программирования под операционную систему Windows. Комплекс позволяет измерять временные и частотные параметры тестового сигнала прошедшего исследуемый тракт. Программно реализованным измерителем анализируется амплитудно-частотный спектр тестового сигнала на выходе исследуемого тракта. Время-частотные характеристики тракта анализируются программным измерителем, который представляет собой дифференцирующий четырехполюсник [2, 4, 5, 7]. Степень искажений опорного сигнала проверяется на основе статистического подхода. В качестве источника опорного сигнала берется сигнал на выходе цифрового синтезатора частотно-модулированных сигналов, который с использованием фазового модулятора переносится в заданный диапазон.

Для исследования участка приемного тракта, где осуществляется обработка сигналов на промежуточной частоте, нет необходимости преобразования сигнала на высокую частоту так, как это реализуется с использованием штатного оборудования. В этом случае достаточно сформировать тестовый ЛЧМ сигнал на выходе цифрового синтезатора и оценить восстановленный сигнал на входе ПЭВМ (рис. 2). Данный измерительный комплекс реализуется программно с использованием штатного оборудования ПЭОМ, что значительно сокращает затраты на его реализацию.

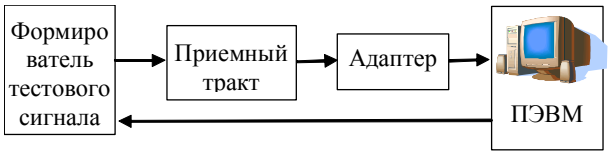

Рис. 2. Исследование участка

Программная часть реализована в операционной системе Windows и имеет удобный интерфейс взаимодействия измерительного комплекса с пользователем. Программа позволяет выбрать один из трех источников сигнала: встроенный программный имитатор сигналов, который позволяет имитировать до 10 сигналов с разными параметрами; сигнал РЛС реального времени; ранее записанные реализации реальных сигналов.

Описание алгоритма работы программы измерительного комплекса

Измерительный комплекс может работать в двух режимах. В режиме прямых измерений и в режиме косвенных измерений. Алгоритмы работы рассмотрим на примере измерения параметров тракта при использовании тестового ЛЧМ сигнала с прямоугольной огибающей. Его девиация должна быть больше полосы пропускания исследуемого тракта, а скорость изменения частоты определяется исходя из априорно заданных значений интервала корреляции оцениваемого параметра.

При оценке допускового контроля определяется степень расхождения сигналов между исследуемым и известным с заданной точностью. Требуемая точность измерения определяется коэффициентом

$$К_Т = \Delta_g / \Delta_u = \delta_g / \delta_u ,$$

где Δ_g и δ_g – допустимое значение и среднеквадратическое отклонение границы допуска исследуемого параметра; Δ_u и δ_u – допустимый предел и среднеквадратическое значение ошибки измерений параметра [2].

При прямых измерениях входными данными для работы алгоритма является массив мгновенных значения исследуемого сигнала прошедшего через исследуемый тракт. При косвенных измерениях на вход ДЧ подается дополнительно тестовый ЛЧМ сигнал. Это позволяет по сигналу биений на выходе ДЧ

$$U_{ДЧ}(t) = \cos(\beta t_z t + \omega_o t_z + \beta t_z^2),$$

где t_z- время задержки, которое несет информацию о скорости изменения частоты β и значении центральной частоты ω_o, определить функцию рассогласования

$$\Delta\rho(i) = U_{ДЧР}(i) - U_{ДЧИ}(i), \qquad (4)$$

где $U_{ДЧИ}(i)$,$U_{ДЧР}(i)$ – сигналы биений идеального и восстановленного сигналов;

Среднеквадратическая ошибка может быть оценена из выражения (3).

Результаты испытаний

Натурные испытания аппаратно-программного комплекса допускового контроля проведены при для анализа усилителя промежуточной частоты (УПЧ) ($f_{прм}$ = 20мГц $f_{max} - f_{min}$ = 430 кГц).

На рис. 3 приведен интерфейс пользователя в режиме прямых измерений при исследовании УПЧ. В верхней части рис. 3 представлена временная реализация ЛЧМ сигнала прошедшего исследуемый тракт. Точность измерения временных параметров определяется частотой дискретизации (тактовой частотой работы АЦП). В зависимости от исследуемого тракта выбирается тактовая частота АЦП и соответственно точность измерения временных параметров. В нижней части рис. 3. представлен спектр сигнала прошедшего через исследуемый тракт. В этом же окне можно отобразить как спектр тестового сигнала так и АЧХ исследуемого тракта. Временной диапазон анализа выбирается органами управления НАЧАЛО и КОНЕЦ, расположенными в верхней части окна (рис. 3) или определяется курсором. Частотный диапазон устанавливается на панели прибора. Точность определяется установкой шага по частоте. В [7, 8] приведены результаты и измерения длительности радиоимпульса, точность которых, при частоте дискретизации $f_д$ = 20МГц составила 50 нс.

Фазо-частотная характеристика исследуемого УПЧ представлена на рис. 4.

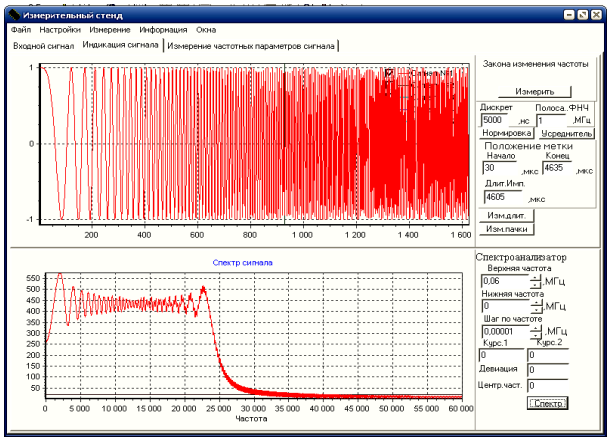

Рис. 3. Временное и спектральное представление тестового сигнала

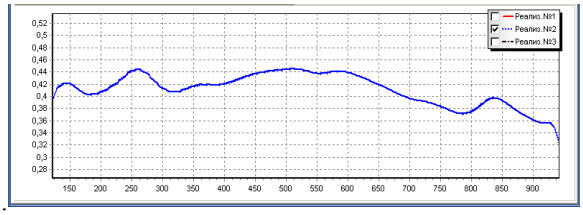

Рис. 4. Внешний вид фазо-частотной характеристики исследуемого УПЧ

Допусковый контроль качества настройки исследуемого УПЧ был проведен путем вариации параметров тестового ЛЧМ сигнала для фиксированных параметров УПЧ. При этом изменялся закон частотной модуляции (кривая 1 рис. 5) и средней частоты при фиксации девиации (кривая 2 рис. 5) тестового сигнала.

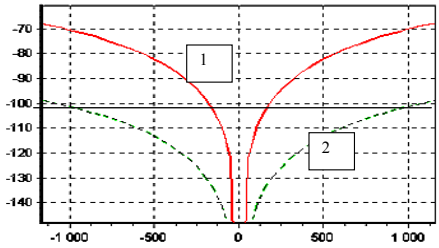

Рис. 5. График зависимости среднеквадратической ошибки при уходе параметра идеального сигнала

Для получения допуска задавались допустимым значением усредненной ошибки восстановленного сигнала. На рис. 5 в качестве допустимой средней ошибки восстановленного сигнала принята величина 103 Дб. При этом фазочастотные искажения исследуемого УПЧ привели к изменению закона частотной модуляции на 0.05%, а рассогласование средних частот тестового сигнала и амплитудно частотной характеристики УПЧ составили 1%.

Изменяя допустимы уровень средних ошибок, можно не только проводить допустимый контроль исследуемого устройства, но и предъявлять требования к его параметрам.

Выводы

1. Предложенный аппаратно-программный измерительный комплекс допускового контролю, позволяющий заменить устаревшие измерительные стенды при обеспечении повышенной точности измерений.

2. Показана возможность повышения точности измерений за счет использования статистической информации о структуре восстановленного сигнала.

3. Испытания подтвердили возможность как осуществления допускового контроля приемных трактов по совокупности параметров, так и измерения с заданной точностью отдельных их параметров.

Список литературы

1. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. –М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.*
2. *Батурин Н.Г. Измерение параметров линейно-частотно модулированых сигналов и их нестабильностей / Н.Г. Батурин, В.И. Гомозов, А.В. Зюкин. – Ярославль: ООО "Торговая фирма "Норд", 2004. – 176 с.*
3. *Кондратьев С.Л. О корреляционной оценке качества канала связи / С.Л. Кондратьев, Ю.В. Карпин // Радиотехника. – 1972. – Т. 27, № 3. – С. 93-95.*
4. *Гомозов В.И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем / В.И. Гомозов. – Х.: Изд-во Шуст А.И., 2002. – 398 с.*
5. *Измерение в электронике: Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.*
6. *Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: Кн. 1. – М.: Сов. радио., 1974. – 550 с.*
7. *Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров сложных сигналов / В.А.Лошаков, В.В. Сидоров // Х.: Радиотехника. – 2007. – № 151. – С. 151-157.*

Надійшла до редколегії 19.09.2011

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИМІРЮВАННЯ ЧАСО-ФАЗО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЛЬНИХ ТРАКТІВ РЛС АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЮ

І.Г. Леонов, В.В. Сидоров, Р.М. Животовський

Пропонується метод вимірювання часо-фазо-частотних характеристик широкосмугових радіоприймальних трактів сучасних РЛС. Розглядається апаратно-програмний комплекс допускового контролю та шляхи підвищення точності вимірення шляхом використання косвеного статистичного методу. Приведені результати випробувань вимірювального комплексу.

Ключові слова: *широкосмуговий радіоприймальний тракт, РЛС, вимірювальний комплекс.*

MEASURING OF TIME-PHASE-FREQUNCY CHARACTERISTICS OF RADARS RECEIVING PATH BY THE HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM OF TOLERANCE CONTROL

I.G. Leonov, V.V. Sidorov, R.N. Zhivotovskiy

The method of time-phase-frequncy characteristics measuring of broadband receiving path of modern radars is offered. Examined hardware and software system of tolerance control and way of measuring accuracy increase due to the use of indirect statistical methods. Results over of measuring complex tests are present.

Keywords: *broadband receiving path, radar, measuring complex.*