

Досліджено статистичні характеристики сигналів вимірювальних ретрансляційних систем та радіолокаційних датчиків в умовах, коли радіохвиля відбивається стабільним та флюктуючим розсіювачами. Встановлено зв'язок між формою щільності вірогідності ЕПР флюктуючої частини об'єкта, який відбиває, і формами щільностей фаз та амплітуд прийнятих сигналів. Запропоновано рекомендації щодо використання статистичних характеристик прийнятих сигналів для підвищення інформативності вимірювальних ретрансляційних систем

Ключові слова: вимірювальна ретрансляційна система, сигнал, фаза, амплітуда, модель, відбивання, статистичні характеристики

Исследованы статистические характеристики сигналов измерительных ретрансляционных систем и радиолокационных датчиков в условиях, когда радиоволна отражается стабильным и флуктуирующим рассеивателями. Установлена связь между формой плотности вероятности ЭПР флуктуирующей части отражающего объекта и формами плотностей фаз и амплитуд принятых сигналов. Даны рекомендации по использованию статистических характеристик принятых сигналов для повышения информативности измерительных ретрансляционных систем

Ключевые слова: измерительная ретрансляционная система, сигнал, фаза, амплитуда, модель, отражение, статистические характеристики

УДК 621.371

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.48279

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ТИПА

А. Ф. Величко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: afvel@yandex.ru

Д. А. Величко

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент*

E-mail: davel@yandex.ru

С. А. Величко

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник**

E-mail: s.a.velichko@yandex.ru

А. В. Вичкань

Младший научный сотрудник*

E-mail: vichkan@ire.kharkov.ua

А. Н. Ключева

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

E-mail: nushyna@mail.ru

К. В. Нетребенко

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

E-mail: vichkan@ire.kharkov.ua

*Отдел обработки радиосигналов***

Отдел дистанционного зондирования Земли*

***Институт радиопизики и электроники

им А. Я. Усикова НАН Украины

ул. Проскуры, 12, г. Харьков, Украина, 61085

1. Введение

В настоящее время совершенствование существующих и создание новых технологий весьма актуально. Потребность в информации о выпускаемой продукции растет пропорционально квадрату расширения и совершенствования производства. Необходимы все более совершенные методы и устройства измерения параметров технологических процессов, новые прецизионные системы контроля состояний трубопроводов, окружающей среды и т. д.

Актуальность разработки и совершенствования методов измерения, контроля и технической диагностики в самых разных областях деятельности современного общества подтверждается тем, что этим успешно занимаются многие корпорации и фирмы разных государств.

В числе средств, предложенных для совершенствования работы радиотехнических и инфокоммуникационных систем на небольших расстояниях, в которых применяются новые радиофизические способы получения информации, выполняются оценки погрешностей измерения, входят измерительные ретрансляционные системы (ИРС) [1–3]. Полезный эффект в ИРС достигается не только за счет усиления взаимодействия радиоволны с пространством распространения и контролируемым объектом [3], но и с помощью пространственно-временной фильтрации. С помощью имитационного моделирования и натурных экспериментов показано, что пространственная направленность ИРС существенно выше пространственной направленности радиолокационного (РЛ) датчика [3].

Ранее с помощью ИРС исследовался контроль объектов, отражательная способность которых не изменя-

ется. Однако часто эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объекта изменяется под воздействием каких либо факторов, появление которых необходимо обнаружить, либо рядом появляются посторонние предметы, ЭПР которых флуктуирует. Случайные изменения принятого сигнала могут быть вызваны изменениями скорости распространения радиоволны на трассе распространения. В результате сигнал, который принимается ИРС, является случайным. В радиотехнике исследованиям статистических характеристик принимаемых сигналов уделяется большое внимание, однако применительно к работе ИРС по флуктуирующим объектам были намечены только некоторые общие направления и получены первые результаты [4, 5]. Они показали, что для совершенствования ИРС необходимы дополнительные сведения о воздействии флуктуирующих объектов на сумму радиоволн, дважды отраженных стабильным и случайным отражателями. Кроме того, необходимо учесть особенности этих воздействий при применении новых методов обработки сигналов, которые предложены в последнее время [6–8].

Проведение таких исследований необходимо потому, что двойное распространение радиоволн при работе ИРС вызывает изменение статистических характеристик отраженных сигналов. Их обработка также меняется по сравнению с той, которая применяется для обработки сигналов РЛ датчиков. Эти изменения определяются основными принципами и методами статистической теории радиосистем [2, 9], которые применяются к сигналам с новыми характеристиками. Необходимо отметить, что статистические характеристики флуктуаций часто используются этой теорией как источники полезной информации.

На первом этапе, результаты которого излагаются далее, изучался наиболее простой случай – исследовались статистические характеристики сигналов, принятых одновременно ИРС и РЛ датчиком при контроле двух, расположенных в одной точке пространства, объектов, у одного из которых ЭПР и фаза коэффициента отражения постоянны, а у второго – флуктуируют. Влияния на характеристики радиоволны пути распространения, входных шумов ретранслятора и приемника ИРС исключались. Исследования выполнялись применительно к обработке сигналов в новых ИРС супергетеродинного типа [6], математическое моделирование которых рассмотрено в [10].

2. Анализ литературных данных

Нередко промежуток между экспериментальными и теоретическими исследованиями часто заполняется компьютерным моделированием [11, 12]. Результаты этих работ позволяют на основе математического моделирования функционирования ИРС [10] определить совокупность объектов, методов, свойств и событий, необходимых для получения статистических характеристик сигналов ретрансляционных измерителей и РЛ датчиков. Первым шагом на пути решения поставленной задачи является составление модели, которая определяет все операторы программы и их взаимосвязи. В качестве основы можно использовать модель, разработанную в [4]. Однако в ней не предусмотрено определение статистических характеристик РЛ датчика.

Эта часть модели [4] может быть дополнена на основе широко используемых радиотехнических методов [13], которые применялись также при разработках в [1, 3].

При применении методов [11, 12] необходимо использовать массивы независимых случайных величин. Исходными случайными величинами могут служить статистически независимые значения ЭПР флуктуирующих объектов, в которых определены коэффициенты и фазы отражений радиоволны. Именно такой механизм воздействия существует в реальных условиях. Для реализации численного эксперимента остается выбрать исследованные ранее псевдослучайные последовательности (ПСП), которые не будут противоречить физическому смыслу работы ретрансляционной системы. Эти требования могут быть достаточно просты и традиционны: величина ЭПР должна быть положительна, а диапазон флуктуаций фазы коэффициента отражения не может выходить за пределы $0 \dots 2\pi$.

В теории вероятностей рассмотрены законы распределений, для которых выполняются такие требования. Количество таких закономерностей достаточно велико. Для них определены пространства событий, функции и плотности распределений, вероятностные утверждения, обратные функции распределения, методы генерирования случайных функций с заданным распределением и много других статистических характеристик. Провести компьютерное моделирование работы ИРС для полной группы событий не представляется возможным. Однако некоторые общие закономерности могут быть установлены компьютерным моделированием и при случайных изменениях отражательной способности, которая распределена по закону Вейбулла. Этот закон уже применялся при оценке распределения суммы сигнала и шума ретрансляционного измерителя [5]. В данном случае дополнительно к используемым ранее свойствам этого закона полезным будет его трансформация в экспоненциальное и релеевское распределение. Использование таких трансформаций позволит минимизировать программы компьютерного моделирования и получить распределения сигналов в ИРС и в РЛ датчиках при изменениях уровня и закона распределения флуктуаций ЭПР объекта.

Как видно из проведенного анализа, пробел в области статистических характеристик сигналов ИРС супергетеродинного типа может быть восполнен с помощью существующих методов исследований случайных процессов [11, 12], используемых методов обработки РЛ сигналов [13] и методов математического описания преобразований сигналов и радиоволн в ИРС [10].

3. Цели и задачи исследования

Цель данной работы состоит в исследовании статистических характеристик сигналов ИРС и РЛ датчиков в условиях, когда радиоволна отражается стабильным и флуктуирующим рассеивателями, и подготовке рекомендаций по использованию статистических характеристик принятых сигналов.

Для этого решаются следующие задачи:

- доработать статистическую модель ИРС для получения оценок информационных параметров сигнала в ретрансляторе;

- установить зависимость между формой плотностей распределения амплитуд и фаз сигналов ИРС и РЛ датчиков с формой плотности распределения ЭПР флуктуирующего отражателя;
- сформулировать предложения по использованию установленных особенностей поведения плотностей распределения амплитуд и фаз сигнала ИРС.

4. Статистическая модель измерительной ретрансляционной системы

Описание процедур и функций, составляющих модель ИРС, приведено в [4]. В нее необходимо внести основные преобразования волн и сигналов [10], формирование информационного α и неинформационного β параметров [9] и их выделение, как в ретрансляционном измерителе супергетеродинного типа, так и в ретрансляторе, сигнал в котором, как отмечено выше, эквивалентен сигналу РЛ датчика. Доработанная модель, в которую добавлены указанные процедуры, и их взаимосвязи, представлена на рис. 1.

Формирование излучаемого сигнала и радиоволны выполняется операторами S_t, A_t . Влияние среды распространения и отражающего объекта на параметры α и β определяются операторами V_1 и V_2 на прямом и обратном пути распространения волны. При этом информационный и неинформационный параметры изменяются на прямом $\alpha_1 \in A, \alpha_2 \in A$ и обратном $\beta_1 \in B, \beta_2 \in B$ пути. Они принимают одно из значений массивов A и B , содержащих результаты сумм детерминированных и случайных воздействий пути распространения и отражения от объектов. Формирование принятого ретранслятором сигнала определяется операторами $A_{in}^{(tf)}, U_{\Sigma}^{(tf)}, N_{in}^{(tf)}, S_{\Sigma in}^{(tf)}, \oplus, U_{\Sigma in}^{(tf)}$.

Выходы операторов $U_{\Sigma}^{(tf)}$ и $U_{\Sigma in}^{(tf)}$ могут подключаться к блоку процедур, которые обрабатывают сигнал, принятый ретранслятором или приемопередатчиком. Поскольку антенна ретранслятора находится рядом с антенной приемопередатчика, ПСП с этих выходов могут использоваться для определения статистических характеристик радиолокационных сигналов.

Оценки статистических характеристик \hat{A}_r и \hat{B}_r параметров α и β выполняются алгоритмами $W_{\alpha r}^{(\ell)}, W_{\beta r}^{(\ell)}$. Процедура $W_{\Sigma r}^{(\ell)}$ вырабатывает обобщенную оценку статистических характеристик под воздействием входного сигнала и оценок \hat{A}_r и \hat{B}_r . Блок определения статистических характеристик радиолокатора использует оператор обобщенного влияния P_r .

Ретранслируемые колебания формирует процедура $W_{tf}(\beta_1, \alpha_1)$. Затем операторы $S_{out}^{(tf)}, A_{out}^{(tf)}$ определяют излучаемые в обратном направлении радиоволны. На обратном пути и во входной части приемопередатчика обработка волн и колебаний производится операторами, аналогичными тем, которые существуют на прямом пути. Оценки \hat{A} и \hat{B} параметров α и β выполняются алгоритмами $W_{\alpha}^{(\ell)}, W_{\beta}^{(\ell)}$ под воздействием обратной связи P . Отдельный оператор Q , который вырабатывает решения под управлением полученных результатов измерений, регулирует излучаемый сигнал. Процедура $W_{\Sigma}^{(\ell)}$ вырабатывает обобщенную оценку $\hat{\Sigma}$.

Как видно из состава операторов и их взаимосвязей, приведенная модель определяет программу численного эксперимента на основе формирования ряда ПСП. Эти ПСП определяются на основе исходных ПСП отражательной способности объекта, распространением и рассеянием радиоволн при прямом прохождении, преобразованиями в ретрансляторе, преобразованиями при обратном распространении радиоволн, преобразованиями и фильтрацией принятого приемопередатчиком сигнала. Получение оценок сигнала в ретрансляторе, который принимается в качестве радиолокационного, и в приемнике ИРС выполняется одним и тем же блоком. Методы получения оценок статистических характеристик сигнала использованы из [15–17].

5. Формирование исходных псевдослучайных последовательностей

Сигналы ИРС и РЛ датчиков являются суммой полезного сигнала и случайного колебания. Первый вызван отражением от стабильной ЭПР, второй – от флуктуирующего во времени отражателя.

ПСП, на основе которых определялись статистические характеристики флуктуирующей части сигналов ИРС и РЛ датчиков, формировались как функции, в которых в качестве аргументов использовались ПСП значений ЭПР и изменений фазы радиоволны при отражении. Значения случайных функций генерировались через временной интервал, который обеспечивал статистическую независимость соседних значений ЭПР флуктуирующего отражателя σ_n и коэффициентов изменения фазы при отражении. Время измерения одного значения предполагалось значительно меньше интервала между независимыми значениями и таким, что внутри этого отрезка параметры флуктуирующего объекта могли считаться постоянными

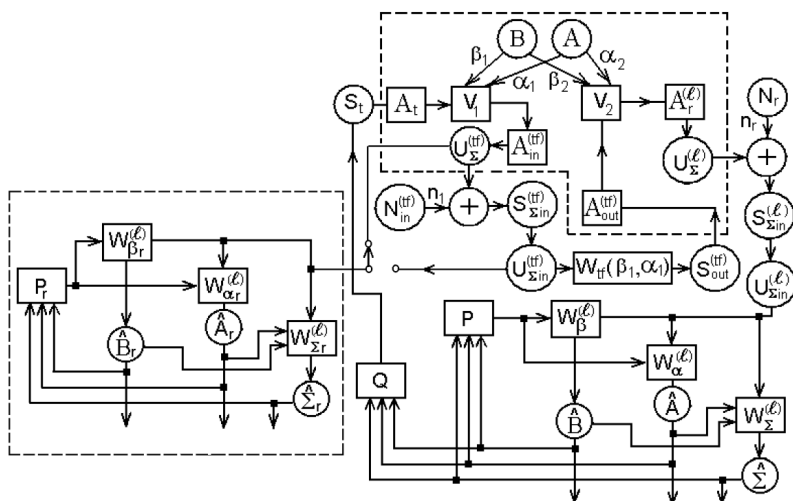


Рис. 1. Статистическая модель ИРС

ми, что обеспечивало выполнение одного из основных требований статистической теории измерительных радиосистем [13]. Такой подход обеспечивал получение массива статистически независимых значений случайных функций. Распределения случайных значений ПСП и их соответствие заданным законам распределения проверялись по критерию согласия χ^2 .

На рис. 2 представлены примеры кривых плотности вероятности сформированных ПСП: 1 – при параметре Вейбулла $form=0,75$; 2 – при $form=1$; 3 – при $form=2$. Значение $masht=2$ принималось одинаковым во всех трех случаях. Между точками случайных значений плотности вероятности гистограмм проведены кривые теоретической плотности Вейбулла при указанных значениях параметров. Кривая 2, как будет показано далее, делит область влияния флуктуационной компоненты отражательной способности объекта на две части.

Исходные сформированные ПСП, с помощью которых имитировалось воздействие флуктуационной компоненты отражательной способности объекта, сопоставлялись с теоретическими плотностями распределения Вейбулла с помощью критерия χ^2 в соответствии с [17]. Во всех случаях вероятности несоответствия сформированной ПСП теоретическому распределению были не более 1 %.

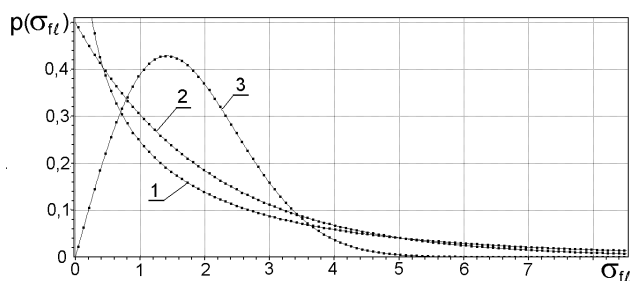


Рис. 2. Гистограммы ЭПР на основе ПСП, сформированных программным способом, и теоретические плотности σ_n с распределением Вейбулла

Сигналы, отраженные флуктуирующей ЭПР, суммировались с сигналами от стабильного отражателя. Переход к ПСП амплитудных и фазовых характеристик входных сигналов, принятых ретранслятором, который являлся эквивалентом РЛ датчика, выполнялся по формулам (2–6) из [10], переход к ПСП входных сигналов приемопередатчика – по формулам (9), (10) из [10].

6. Статистические характеристики сигналов

В результате компьютерного моделирования были получены плотности распределения фазы и амплитуды сигналов, принятых ИРС и РЛ датчиком. Фаза сигнала является основным информационным параметром ИРС [1], а амплитуда позволяет делать выводы о соотношении сигнал/шум. Как отмечено во введении, в данном случае в качестве шумовой компоненты сигнала считались только колебания, вызванные отражением от флуктуирующей части отражателя. При этом излучаемая радиоволна при прохождении прямого пути от передатчика ИРС к отражающе-

му объекту однократно отражалась от стабильной и флуктуационной частей отражателя, что определяло соотношение сигнал/шум равным отношению стабильной и флуктуационной части отражающего объекта. При распространении в обратном направлении в приемник ИРС поступало 4 составляющих, так как и стабильная, и флуктуационная части радиоволны отражались одновременно стабильной и флуктуационной компонентами ЭПР.

Рассмотрим вначале результаты численных экспериментов при распределении флуктуационной части ЭПР по закону Вейбулла с параметром $form < 1$. В этом случае плотность распределения флуктуационной компоненты $p(\sigma_n)$ устремляется к бесконечности при $\sigma_n \rightarrow 0$, что следует из дифференциальной формы закона распределения Вейбулла [14, 17] (рис. 2, кривая 1). Однако никаких нарушений статистических закономерностей не возникает, в чем можно убедиться, рассмотрев интегральную форму этого закона в области $\sigma_n \geq 0$.

На рис. 3 приведены плотности вероятности фазы (рис. 3, а) и амплитуды (рис. 3, б) сигналов, принятых РЛ датчиком и ИРС при параметрах $form=0,75$ и $masht=2$. Кривыми 1, 3 и 5 представлены распределения фаз и амплитуд сигналов РЛ датчика, кривыми 2, 4 и 6 – распределения аналогичных характеристик сигналов ИРС. Плотности 1 и 2 получены при соотношении ЭПР стабильного отражателя к ЭПР флуктуирующего равном 35 дБ, 3 и 4 – при 25 дБ, 5 и 6 – при 15 дБ.

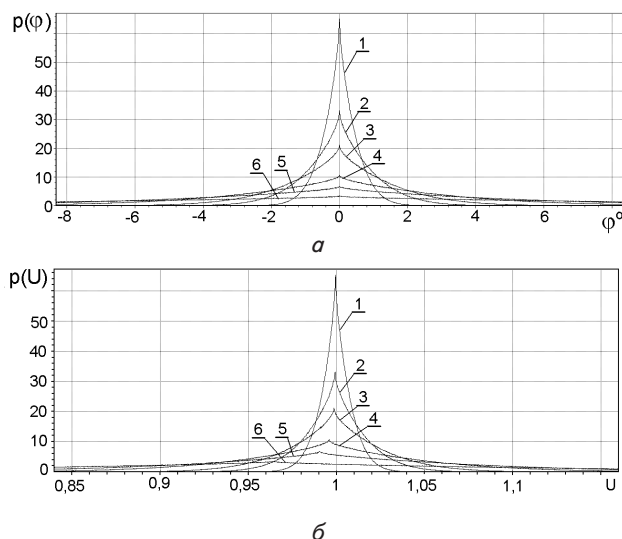


Рис. 3. Плотности вероятности фаз и амплитуд сигналов ИРС и РЛ датчиков при параметре распределения Вейбулла $form=0,75$: а – плотности вероятности фаз; б – плотности вероятности амплитуд

Как видно из приведенных зависимостей, в центральной части всех плотностей вероятности наблюдается скачок производной. Это явление может объясняться поведением функции – плотность распределения Вейбулла при параметре $form < 1$. При этом значении, как отмечено выше, плотность распределения флуктуационной части ЭПР устремляется к бесконечности (рис. 2, зависимость 1).

Другой особенностью закона распределения амплитуд и фаз сигналов ИРС и РЛ датчика является то, что ширина плотностей распределения фаз и амплитуд сигналов ИРС приблизительно в два раза шире плотностей распределения сигналов РЛ датчиков. В результате появление флуктуационной составляющей отражающего объекта при использовании ИРС будет обнаруживаться раньше, чем при использовании РЛ датчика. Это обусловлено более интенсивным появлением отклонений от стабильной компоненты сигнала в случае использования ИРС.

При увеличении параметра $form$ до значения $form=1$ происходит принципиальное изменение центральной части плотностей распределения параметров сигналов ИРС и РЛ датчиков. На рис. 4 приведены зависимости для случая $form=1$; на нем сохранены все обозначения рис. 3, параметр $masht=2$ остался прежним. Напомним, что при $form=1$ распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением.

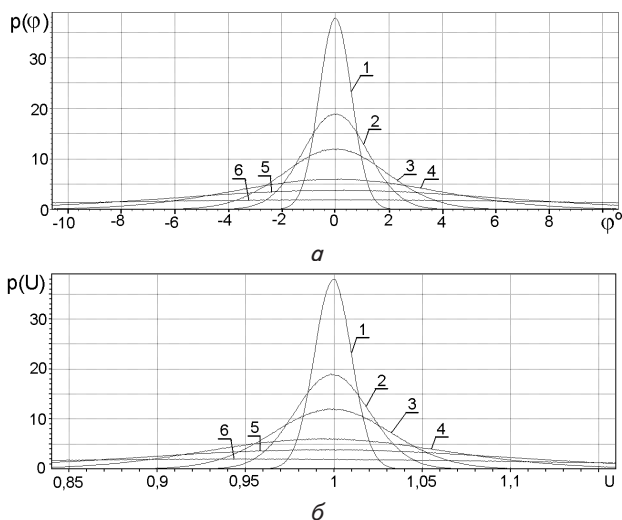


Рис. 4. Плотности вероятности фаз и амплитуд сигналов ИРС и РЛ датчиков при параметре распределения Вейбулла $form=1$: a — плотности вероятности фаз, $б$ — плотности вероятности амплитуд

Как видно из приведенных распределений фаз и амплитуд сигналов ИРС и РЛ датчиков на рис. 4, в центральной части зависимостей производная равна нулю. Это связано с тем, что при параметре $form=1$ плотность распределения конечна и равна $p(\sigma_n)_{\sigma_n=0} = \frac{form}{masht}$, что иллюстрируется на рис. 2 кривой 2. Так же, как и в законах распределения первого типа, приведенных на рис. 3, ширина плотностей распределения фаз и амплитуд сигналов ИРС в два раза шире соответствующих распределений сигналов РЛ датчиков. Это значит, что появление флуктулирующей составляющей ИРС будет обнаруживать лучше, чем РЛ датчик.

Влияние дальнейшего увеличения параметра $form$ показано на рис.5.

Параметры распределения Вейбулла на рис. 5 приняты $form=1$, $masht=2$. При этом распределении σ_n — флуктулирующей части ЭПР снова принципиально меняют зависимость плотности распределения фаз и

амплитуд сигналов ИРС и РЛ датчиков. Как видно из рис. 5 в центральной части появился провал. Глубина провала возрастает при увеличении параметра $form$. Как и в предыдущих случаях, на рис. 5 ширина плотности распределения амплитуд и фаз сигналов ИРС остается приблизительно в два раза шире соответствующих характеристик сигналов РЛ датчиков.

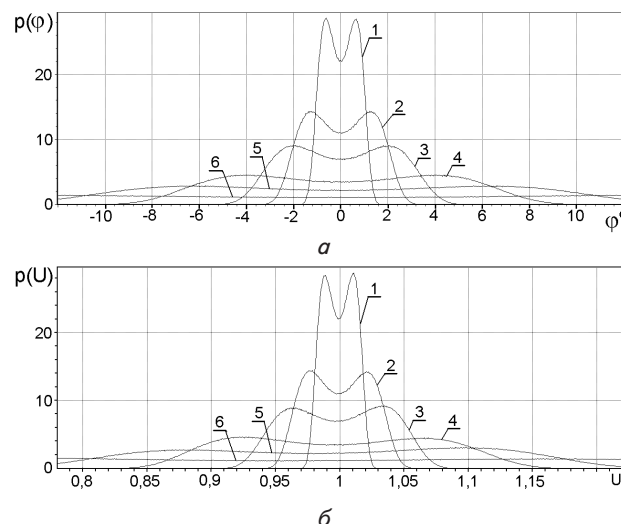


Рис. 5. Плотности вероятности фаз и амплитуд сигналов ИРС и РЛ датчиков при параметре распределения Вейбулла $form=2$: a — плотности вероятности фаз, $б$ — плотности вероятности амплитуд

7. Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения сравнительных исследований статистических характеристик сигналов ИРС и РЛ датчиков в условиях одновременного воздействия на радиоволну стабильного и флуктулирующего отражателей была доработана статистическая модель ИРС, введением в нее процедур оценки информационных параметров сигнала в ретрансляторе, что эквивалентно нахождению этих оценок для РЛ датчика.

Во всех рассмотренных случаях, приведенных на рис. 3–5, четко наблюдается зависимость формы плотности распределения фаз и амплитуд принятых сигналов от формы плотности распределения флуктулирующей части ЭПР контролируемого объекта. Очевидно, что связь между формами распределений флуктуационной части ЭПР контролируемого объекта и формами распределений характеристик принятых сигналов можно использовать для оценок типа воздействия и причин, вызвавших флуктуационный процесс.

Расширение флуктуационной компоненты сигналов может объясняться тем, что на обратном пути распространения радиоволна, сформированная в ретрансляторе той частью колебаний, которые вызваны при прямом прохождении отражением от стабильного объекта, разделяется на две части. Одна часть при обратном распространении отражается стабильным объектом, вторая — флуктулирующим. За счет этого флуктулирующая часть колебаний в приемнике ИРС обогащается. Этот результат подтверждается соп-

ставлением стабильных и флуктуирующих частей колебаний, принятых РЛ датчиком и приемником ИРС. Необходимо отметить, что появление более широкой области флуктуаций фаз и амплитуд сигналов ИРС при наблюдении стабильного отраженного сигнала приведет к более раннему, чем в РЛ датчике, обнаружению начала флуктуаций ЭПР контролируемого объекта.

8. Выводы

Статистический анализ ИРС и РЛ датчиков, проведенное компьютерное моделирование позволяют сделать следующие выводы.

Установлено, что форма плотности распределения амплитуд и фаз сигналов ИРС и РЛ датчиков зависит от формы плотности распределения ЭПР флуктуирующей части отражающего объекта.

Установлено, что плотности распределения фаз и амплитуд входных сигналов ретрансляционной системы приблизительно в два раза шире, чем соответствующие плотности вероятностей входных сигналов РЛ датчиков, приведено обоснование расширения плотности флуктуаций за счет двойного отражения радиоволны стабильной и флуктуирующей частями отражающего объекта при прямом и обратном распространении радиоволны.

Предложено использовать связь между формами распределений флуктуационной части ЭПР контролируемого объекта и формами распределений характеристик принятых сигналов для определения оценок типа воздействия, которое, вызвало флуктуационный процесс.

Предложено использовать расширение дифференциального закона распределения характеристик сигналов, принятых ИРС, для повышения вероятности обнаружения процессов, вызывающих флуктуацию отражающей способности контролируемых объектов.

Литература

1. Величко, А. Ф. Ретрансляционный метод измерения и подавления помеховых отражений при непрерывном излучении с частотной модуляцией [Текст] / А. Ф. Величко, Д. А. Величко // Известия вузов «Радиоэлектроника». – 1998. – Т. 41, № 11. – С. 3–12.
2. Обработка и преобразование сигналов в радиотехнических и инфокоммуникационных системах [Текст]: монография / под ред. В. И. Воловача. – М.: Радио и связь, 2014. – 448 с.
3. Величко, А. Ф. Дистанционные методы и средства для исследования процессов в атмосфере земли. Глава 8. Дистанционная диагностика технологических параметров [Текст] / А. Ф. Величко, Д. А. Величко, И. В. Курбатов, В. М. Шокало. – Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники, Бизнес Информ, 2002. – 426 с.
4. Величко, Д. А. Моделирование характеристик многочастотной ретрансляционной системы [Текст] / Д. А. Величко // Известия вузов «Радиоэлектроника». – 2008. – № 2. – С. 14–24.
5. Величко, Д. А. Применение распределения Вейбулла при оценке амплитуды суммы сигнала и шума ретрансляционного измерителя [Текст] / Д. А. Величко // Радиотехника. – 2008. – Вып. 152. – С. 83–90.
6. Воловач, В. И. Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств ближнего действия [Текст] / В. И. Воловач. – М.: Радио и связь, 2013. – 228 с.
7. Artyushenko, V. M. Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes [Text] / V. M. Artyushenko, V. I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). – Kharkov: KNURE, 2013. – P. 137–140.
8. Kim, S. Sensing Performance of Energy Detector with Correlated Multiple Antennas [Text] / S. Kim, J. Lee, H. Wang, D. Hong // IEEE Signal Processing Letters. – 2009. – Vol. 16, Issue 8. – P. 671–674. doi: 10.1109/lsp.2009.2021381
9. Фалькович, С. Е. Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 287 с.
10. Величко, А. Ф. Моделирование работы ретрансляционного измерителя супергетеродинного типа с аналого-цифровой обработкой [Текст] / А. Ф. Величко, Д. А. Величко, С. А. Величко, А. В. Вичкань, А. Н. Ключева, К. В. Нетребенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 9 (74). – С. 46–52. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40452
11. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике [Текст] / Д. В. Хеерман; пер. с англ.; под ред. С. А. Ахманова. – М.: Наука, 1990. – 176 с.
12. Биндер, К. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике [Текст] / К. Биндер, Д. В. Хеерман; пер. с англ. В. Н. Задкова. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 144 с.
13. Справочник по радиолокации. Т. 3. Радиолокационные устройства и системы [Текст] / пер. с англ.; под ред. М. Сколника. – М.: Сов. радио, 1979. – 528 с.
14. Weibull, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability [Текст] / W. Weibull // J. Appl. Mech. – 1951. – Issue 18. – P. 293–297.
15. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
16. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 464 с.
17. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] / Г. Хан, С. Шапиро; пер. с англ. Е. Г. Коваленко; под ред. В. В. Налимова. – М.: Мир, 1969. – 396 с.