

УДК 621.371.551

**А.С. Аникин, М.В. Крутиков**

## Временные характеристики сигналов источника сантиметрового радиоизлучения, прошедших пересечённую наземную трассу

Проанализированы временные реализации огибающих принимаемых сигналов пространственно разнесёнными антеннами и разности фаз между ними на десятисекундных интервалах. Приведены экспериментальные оценки интервалов стационарности огибающей и разности фаз, зависимости от углового положения антенны передатчика интервалов временной корреляции огибающей и разности фаз, а также коэффициента взаимной корреляции огибающей и разности фаз. Полученные характеристики сопоставлены с ранее опубликованными результатами.

**Ключевые слова:** экспериментальные данные, огибающая, разность фаз, интервал стационарности, коэффициент корреляции, интервал временной корреляции, статистические характеристики, угловое положение антенны, источник радиоизлучения.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-4-57-63

Искажения огибающей принимаемых сигналов и разности фаз между сигналами в пространственно разнесённых точках на наземных пересечённых трассах прямой видимости и дифракции вызваны, главным образом, многолучевостью из-за отражения радиоволн подстилающей поверхностью и находящимися на ней объектами (местными предметами) [1, 2]. При пеленговании источника радиоизлучения на наземных пересечённых трассах в некоторых угловых положениях антенны передатчика наблюдаются аномально большие ошибки пеленгования, вызванные неадекватностью традиционных моделей принятых сигналов при разработке алгоритмов пеленгования условиям распространения радиоволн в условиях эксперимента. Это приводит к необходимости разработки статистических моделей принимаемых сигналов, адекватных экспериментальным данным. Модели используются для синтеза алгоритмов обработки сигналов, улучшающих технические характеристики радиотехнических систем [1, 3]. Интерес представляют статистические характеристики быстрых флуктуаций принятых сигналов, которые обычно наблюдаются на интервалах времени не более нескольких секунд [1–3].

Ранее были опубликованы работы по оценкам статистических характеристик флуктуаций огибающей, фазы и разности фаз принятых сигналов по временным реализациям длительностью 1–3 мин на сухопутных радиотрассах протяжённостью до 210 км в сантиметровом диапазоне длин волн [1–8]. В этих работах были получены экспериментальные оценки дисперсии, корреляционных и структурных функций, интервалов корреляции огибающих сигналов, принятых на разнесённые антенны, и разности фаз между ними в зависимости от дальности и углового положения узконаправленной передающей антенны, выявлены физические причины, приводящие к полученным закономерностям. Однако имеющиеся в распоряжении авторов материалы позволяют дополнить известные результаты оценками интервалов временной корреляции одновременно для огибающей принимаемых на разнесённые антенны сигнала

и разности фаз между ними, а также коэффициента взаимной корреляции огибающей и разности фаз в зависимости от углового положения направленной антенны РЛС и протяжённости радиотрассы. Эти характеристики являются важными для использования нормальной модели принимаемого сигнала [3].

Цель работы – получить оценки перечисленных выше статистических характеристик быстрых флуктуаций огибающей принимаемых сигналов и разности фаз между ними при пространственно разнесённом приёме для различной ориентации остронаправленной антенны передатчика и протяжённости трассы.

Статистические характеристики определены путём обработки экспериментальных данных, полученных сотрудниками НИИ РТС ТУСУР в 2008–2010 гг. [6–8].

На оценки статистических характеристик принимаемых сигналов влияют параметры экспериментальной аппаратуры, поэтому приведём её краткое описание.

### Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных измерений использовались приёмно-измерительная аппаратура (приёмный пункт) и аппаратура передающего пункта (РЛС), изготовленная сотрудниками НИИ РТС ТУСУРа. Подробное описание приёмно-измерительной аппаратуры изложено в работе [9].

Во время проведения экспериментальных измерений антенна передатчика (РЛС) принимала фиксированные угловые положения в интервале  $\pm 6^\circ$  с шагом  $3^\circ$ , отсчитываемые от направления на приёмный пункт. Оценка статистических характеристик производилась по временным реализациям огибающих последовательности импульсных радиосигналов на выходе пространственно-разнесённых антенн и разности фаз между ними, которые регистрировались ранней осенью сеансами длительностью 10 с с дискретностью  $\Delta t = 0,01$  с при фиксированном угловом положении антенны РЛС. Качественная оценка характеристик сигнала производилась вручную путём анализа каждой реализации общим количеством более 600 шт.

Аппаратура источника излучения и приёмного пункта была синхронизирована. При измерениях производилась запись в память ЭВМ цифровых отсчётов принятых сигналов за определённый промежуток времени (в окне регистрации). Укрупнённая структурная схема экспериментального комплекса приведена на рис. 1.

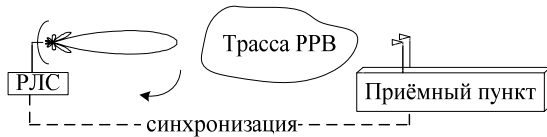


Рис. 1. Укрупнённая структурная схема комплекса при проведении экспериментальных измерений

При измерениях РЛС сантиметрового диапазона излучала радиопульсы длительностью 300 нс (по уровню  $-3$  дБ) с частотой повторения 2 кГц. РЛС имела зеркально-параболическую антенну диаметром 110 см типа Кассегрена с облучателем в виде открытого конца прямоугольного волновода. Ширина ДНА в плоскости азимута по уровню  $-3$  дБ около  $1,7^\circ$ . Уровень боковых лепестков не превышает  $-15$  дБ. При обработке экспериментальных данных рассматривались только случаи излучения радиоволн вертикальной поляризации.

Приёмник с динамическим диапазоном 71 дБ имеет чувствительность  $-100$  дБ/мВт (3,2 мкВ). Полоса пропускания приёмника составляет 25 МГц, поэтому линейными искажениями сигналов из-за влияния приёмного тракта можно пренебречь. Перед аналого-цифровым преобразованием сигнал переносится на видеочастоту квадратурным демодулятором (детектором). По квадратурам за длительность плоской вершины импульса определялись огибающая и разность фаз с помощью формул, приведённых в работах [6–8].

Антенная система приёмного пункта, состоящая из восьми прямоугольных рупорных антенн, расположенных в два ряда, наводилась на источник излучения по максимуму сигнала (рис. 2).

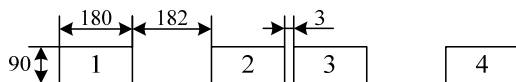


Рис. 2. Размеры одного ряда антенн (в мм) (заимствовано из [9])

Ширина диаграммы направленности рупорной антенны в горизонтальной плоскости по уровню  $-3$  дБ составляла около  $8,5^\circ$ .

Пространственное разнесение приёмных антенн при измерениях составляло  $30\lambda$  и  $6\lambda$ .

#### Описание наземных пересечённых трасс

Наземные пересечённые трассы расположены в Томском районе Томской области к юго-западу от г. Томска на Обь-Томском междуречье [6–8]. Местность представляет собой расчленённую равнину с участками верхового и низинного заболачивания.

Статистические характеристики получены для наземных пересечённых трасс, которые разделены

на четыре группы по средней протяжённости 16,8; 19,0; 23,0 и 28,0 км. Сеансы измерений для каждой трассы производились для каждого из пяти угловых положений антенны РЛС. Передающие позиции выбирались на относительно ровных, открытых участках, расположенных от ближайших препятствий на расстоянии 150–1500 м.

Препятствия на линии «передатчик–приёмник» представлены для группы трасс протяжённостью: 16,8 и 19,0 км в виде отдельных редких лесных массивов; передающие позиции были расположены в поле, поросшим луговой травой высотой до 0,25 м; 23,0 км в виде часто встречающихся лесных массивов; а передающие позиции были расположены на поляне, поросшей луговой травой высотой до 0,5 м, и кустарниками; 28,0 км в виде густых лесных массивов; передающие позиции были расположены на поляне, трава на которой была скошена, окружённой густым лесом.

Приемная позиция располагалась на правом берегу р. Томи с превышением 80 м над окружающей местностью. Правый берег покрыт лесом средней густоты, далее по трассам расположены речная долина, остров с обширными покосами, населённый пункт сельского типа с дачными участками неплотной застройки. Остальные участки трассы представляют собой равнину с небольшим уклоном вверх до абсолютной отметки 140 м, покрытую луговой растительностью, покосами, пашнями, лесом средней густоты, редколесьем.

При проведении измерений была ясная или пасмурная погода без дождя и ветром до 5 м/с.

Рассмотрим оценки статистических характеристик огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн и разности фаз между ними, полученные на указанных трассах.

#### Интервалы стационарности огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними

Оценки интервалов стационарности огибающей и разности фаз отмечаются в работах [1–3]. Согласно этим работам, быстрые флуктуации огибающих принятых сигналов стационарны обычно в течение нескольких минут, хотя значительные изменения могут наблюдаться в течение десяти секунд [10]. В этих работах не приводятся критерии, согласно которым по экспериментальным данным флуктуации считаются стационарными, а также не опубликованы интервалы стационарности разности фаз в зависимости от протяжённости трассы и углового положения передающей антенны. Отмечается лишь, что на коротких закрытых трассах отвороты антенны РЛС сопровождаются «увеличением нестационарности случайных изменений параметров сигналов», а на дальностях более 70 км нестационарность флуктуаций огибающей проявляется в «значительно меньшей степени» [1–3].

Рассмотрим типичные примеры временных реализаций огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними при наведении антенны

РЛС областью минимума на приёмный пункт. Реализации представлены на рис. 3 для трассы протяжённостью 23 км.

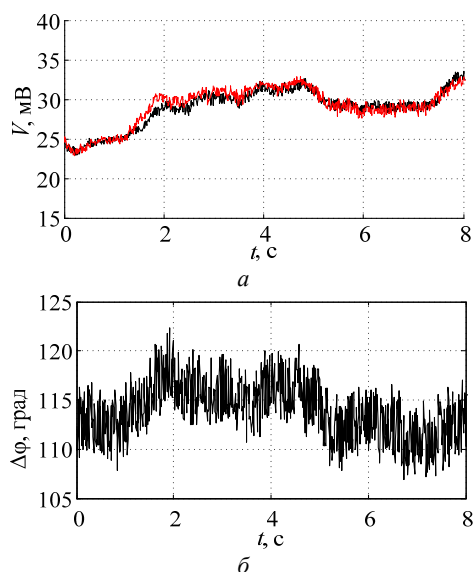


Рис. 3. Пример временных реализаций огибающей принятых сигналов: *a* – и разности фаз между ними на базе  $30\lambda$ ; *b* – для трассы протяжённостью 23 км при угловом положении антенны РЛС  $-6^\circ$  относительно направления на приёмный пункт

На графиках наблюдаются участки времени, на которых огибающая  $V$  принятых сигналов и разность фаз  $\Delta\varphi$  между ними флуктуирует вокруг постоянного среднего значения (интервалы стационарности), а также интервалы времени, на которых эти характеристики имеют очевидную тенденцию (тренд) к увеличению или уменьшению. Аналогичные участки наблюдаются также на остальных трассах.

Для нахождения интервалов стационарности «постоянство» среднего определялось сначала визуально, а затем уточнялось с помощью скользящего среднего. На интервале стационарности среднее значение изменяется не более чем на 1%. Для наведенной на приёмный пункт передающей антенны при таком критерии на интервалах стационарности среднеквадратические флуктуации огибающей и разности фаз оказываются практически одинаковыми.

Интервалы стационарности огибающей и разности фаз в большинстве случаев различаются по длительности. Интервал стационарности изменяется случайно при отвороте антенны РЛС, практически не зависит от протяжённости и геометрии исследуемых трасс и от пространственного разнесения приёмных антенн до  $30\lambda$ .

Изменения огибающих принятых сигналов с отворотом антенны РЛС от направления на приёмный пункт становятся более значительными, что вызвано снижением доли прямого сигнала и увеличением вклада отражённых сигналов. Это не противоречит результатам работ [1–3].

Анализ показал, что интервал стационарности огибающей оказывается заметно меньше, чем интервал стационарности разности фаз.

Для совокупности наземных пересечённых трасс длительность интервала стационарности огибающих не противоречит нормальному закону распределения и составляет в среднем 0,1 с со среднеквадратическим отклонением (СКО) 0,015 с, а разности фаз в среднем 0,2 с со СКО 0,04 с. Эти интервалы стационарности на порядки меньше, чем указаны в работах [1–3]. Вероятно, это обусловлено применением в этих работах других критериев стационарности.

Для закрытых трасс при угловых положениях антенны РЛС, отличных от направления на приёмный пункт, наблюдаются значительные изменения разности фаз во времени (рис. 4), например, как это имеет место на интервале от 1 до 2 с.

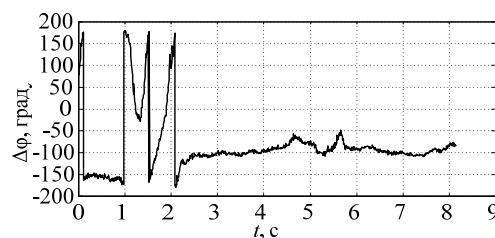


Рис. 4. Пример временной реализации разности фаз между принятыми сигналами на базе  $30\lambda$  для сухопутной трассы протяжённостью 19 км при угловом положении антенны РЛС  $+6^\circ$  относительно направления на приёмный пункт

Значительные изменения разности фаз за 10 с, многократно (в среднем 2–5 раз) превышающие сектор однозначного измерения ( $360^\circ$ ), вероятно, вызваны перемещением отражающих элементов местности (групп «блестящих» точек) под воздействием ветра. Это в разы больше, чем указано в работах [1–3]: согласно последним изменения разности фаз на базе  $30\lambda$  за минуту не превышали  $40\text{--}50^\circ$ . При пространственном разнесе приёмных антенн  $6\lambda$  разность фаз в интервале от 1 до 2 с изменяется в 2–3 раза меньше значения, соответствующего сектору однозначности.

Интервал пространственной корреляции фазового фронта при отворотах антенны РЛС оказывается менее  $6\lambda$ , а значительные изменения и флуктуации разности фаз для пространственных разнесов  $6\lambda$  и  $30\lambda$  оказываются некоррелированными. Это согласуется с результатами работ [1–3].

Можно предположить, что изменения во времени огибающих принятых сигналов и разности фаз между ними вызваны различными доминирующими механизмами: на интервале стационарности флуктуации вызваны преимущественно флуктуациями диэлектрической проницаемости тропосферы или беспорядочным перемещением «блестящих» точек элементов рельефа местности в разных направлениях.

Значительные изменения (тренды) огибающих принятых сигналов и разности фаз между ними могут быть вызваны существенным изменением амплитудно-фазовых соотношений интерферирующих волн из-за перемещения в некотором преимущественном направлении групп «блестящих» точек под

стилающей поверхности, местных предметов, препятствий.

### Интервалы временной корреляции флуктуаций огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними на интервалах стационарности

Интервалы временной корреляции временных флуктуаций огибающих или разности фаз оценивались для наземных пересечённых трасс разными исследователями [1–3, 11, 12] по уровню  $1/e$  автокорреляционной функции. Оценки этих интервалов производились по импульсным последовательностям, регистрируемым в течение 1–3 мин [1–3], или за длительность импульсного сигнала [11, 12].

Наиболее изученными являются флуктуации огибающей импульсной последовательности в зависимости от протяжённости трассы, пространственного разнеса приёмных антенн и углового положения передающей антенны [1–3]. Для интервалов временной корреляции разности фаз получены зависимости только от пространственного разнеса приёмных антенн и протяжённости трассы [3]. Однако на исследуемых в [1–3] наземных пересечённых трассах интервалы стационарности огибающей и разности фаз составляют доли секунды.

В работах [11, 12] исследуются флуктуации огибающей и разности фаз за длительность импульсного сигнала, вызванные интерференцией отражённых волн с разным временем прихода относительно волны от РЛС. Интервал временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций огибающей при наведённых приёмопередающих антеннах составляет в среднем 25 нс, а интервал временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций разности фаз по совокупности исследуемых трасс – в среднем 180 нс. Явной зависимости интервала временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций огибающей и разности фаз от дальности и углового положения антенны РЛС не выявлено [11, 12].

Рассмотрим интервалы временной корреляции огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними на интервалах стационарности и выясним, зависят ли они от углового положения, протяжённости трассы и пространственного разнеса приёмных антенн. Интервалы временной корреляции будем определять по уровню  $1/e$  нормированной временной автокорреляционной функции.

Анализ показал, что интервал временной корреляции огибающих принимаемых сигналов практически не зависит от перемещения приёмной антенны поперёк трассы в пределах  $30\lambda$ , поэтому вычислялся средний для приёмных антенн интервал временной корреляции огибающей.

Примеры средних по совокупности трасс интервалов временной корреляции огибающих принимаемых сигналов  $\tau_E$  (рис. 5, а) и разности фаз  $\tau_{\Delta\psi}$  между ними для пространственных разнесов антенн  $30\lambda$  (рис. 5, б) и  $6\lambda$  (рис. 5, в) в зависимости от углового положения антенны РЛС приведены для интервалов стационарности (сплошная линия). Пункти-

ром показаны средние значения интервалов временной корреляции по совокупности трасс.

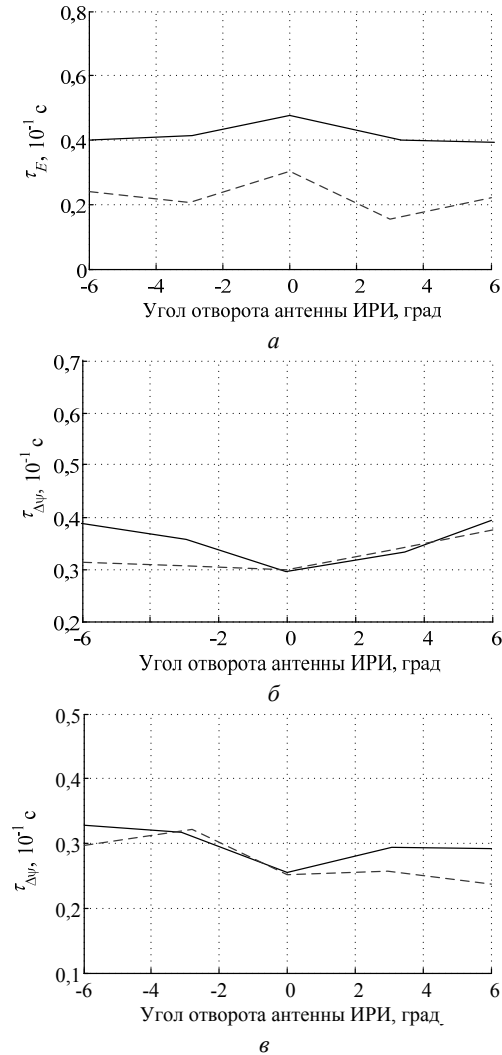


Рис. 5. Среднее значение (сплошная) и СКО (пунктир) интервала временной корреляции огибающей  $\tau_E$  и разности фаз  $\tau_{\Delta\psi}$  по совокупности всех трасс; интервал стационарности

Для огибающей и разности фаз интервал временной корреляции от отворота антенны РЛС меняется незначительно на интервале стационарности. Интервал временной корреляции разности фаз незначительно зависит от пространственного разнеса приёмных антенн от  $6\lambda$  до  $30\lambda$ . Отсутствует явная зависимость интервалов временной корреляции на интервалах стационарности от протяжённости исследуемых трасс. Это расходитсся с результатами работ [1, 2], вероятно, из-за доминирующего влияния разных механизмов, вызывающих флуктуации огибающей и разности фаз, проявляющихся на разных по длительности интервалах наблюдения.

В среднем по совокупности трасс и угловым положениям антенны РЛС интервал временной корреляции огибающей принятого сигнала составляет 0,04 с, а разности фаз выходных сигналов приёмных антенн с пространственными разнесами от  $6\lambda$  до  $30\lambda$  около 0,03 с.

Интервалы корреляции огибающей и разности фаз на интервалах длительностью 0,1–0,2 с примерно одинаковы, но оказываются в 5–10 раз меньше, чем при вычислении по интервалам времени наблюдения 1–3 мин [1–3]. Так, при наведённой на приёмный пункт антенне РЛС интервал временной корреляции флуктуаций огибающей составляет от 2 до 4 с, а отворот передающей антенны на 15° относительно приёмного пункта приводит к его уменьшению до 1,2–1,4 с. Для разности фаз интервал временной корреляции составляет 0,3–0,6 с [1–3] при наведённой антенне РЛС на приёмный пункт.

**Интервалы временной корреляции флуктуаций огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними на 10-секундных интервалах**

Оценим интервалы временной корреляции огибающих принятых сигналов  $\tau_E$  (рис. 6, а) и разности фаз  $\tau_{\Delta\psi}$  между ними для пространственных разносов антенн  $30\lambda$  (рис. 6, б) и  $6\lambda$  (рис. 6, в) по временным реализациям длительностью 10 с.

Качественно зависимости интервалов корреляции огибающей и разности фаз от углового положения антенны РЛС и протяжённости трассы такие же, как для интервалов стационарности: интервал временной корреляции огибающей уменьшается, а для разности фаз – увеличивается.

Интервалы временной корреляции огибающей принимаемых сигналов и разности фаз между ними от протяжённости исследуемых трасс и пространственного разноса приёмных антенн практически не зависят. Эти результаты частично расходятся с указанными результатами в работах [1–3]. Согласно этим работам интервал временной корреляции огибающей и разности фаз с увеличением протяжённости трассы уменьшается, а интервал временной корреляции разности фаз возрастает с увеличением пространственного разноса приёмных антенн. В то же время зависимость интервала временной корреляции огибающей от углового положения антенны РЛС согласуется с результатами из [1–3].

Средний по совокупности трасс и угловым положениям антенны РЛС интервал временной корреляции флуктуаций огибающей составляет 0,7 с, а флуктуаций разности фаз выходных сигналов приёмных антенн с разносами от  $6\lambda$  до  $30\lambda$  практически постоянен и составляет около 0,33 с. Интервал временной корреляции огибающей оказывается больше примерно в два раза, чем интервал временной корреляции разности фаз. Эти результаты не противоречат [1–3].

Возрастание интервала корреляции флуктуаций разности фаз и уменьшение интервала корреляции флуктуаций огибающей при отклонении антенны передатчика от пункта приёма может быть объяснено возрастанием вклада в результирующий сигнал отражённых сигналов. При наведённой антенне РЛС на приёмный пункт среднее огибающей и среднее разности фаз определяется прямым сигналом РЛС, а флуктуации огибающей разности фаз обусловлены

малыми изменениями во времени углового положения центра тяжести энергетического спектра рассеянных волн. Для отвёрнутой антенны передатчика разность фаз определяется интерференцией отражённого сигнала от объекта на местности в направлении антенны РЛС и прямого сигнала РЛС, а флуктуации разности фаз становятся более медленными. При этом флуктуации огибающей сигнала обусловлены интерференцией парциальных сигналов из-за перемещения соответствующих «блестящих» точек объекта, соответствующего отражённому сигналу.

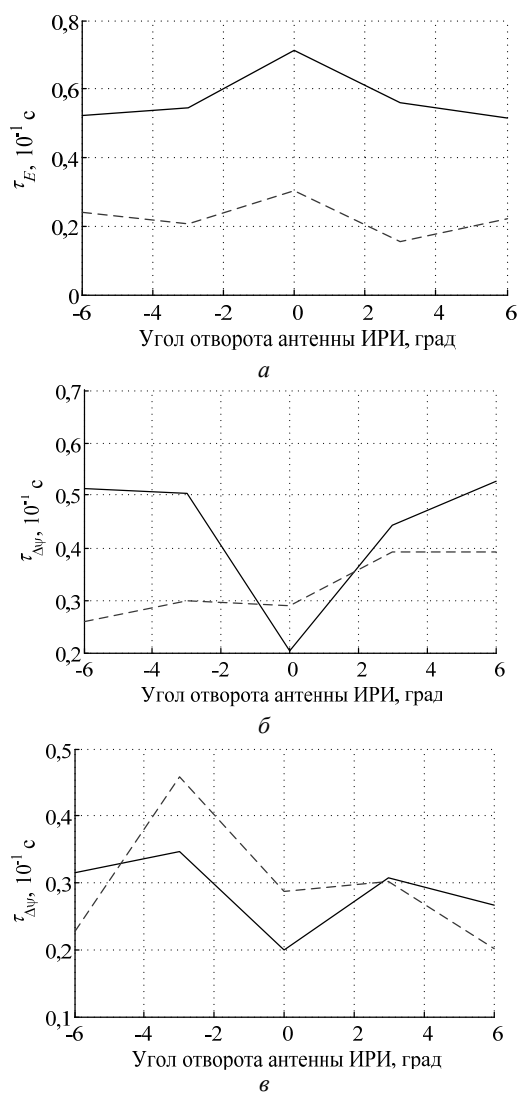


Рис. 6. Среднее значение (сплошная) и СКО (пунктир) интервала временной корреляции огибающей  $\tau_E$  и разности фаз  $\tau_{\Delta\psi}$  по совокупности всех трасс; 10-секундный интервал

**Коэффициент корреляции флуктуаций огибающих принимаемых сигналов и флуктуаций разности фаз между ними**

Коэффициент взаимной корреляции между мгновенными значениями разности фаз выходных сигналов пространственно разнесённых антенн и мгновенными значениями огибающей входного сигнала одной из антенн оценивался экспериментально для наземных пересечённых трасс в работах [1–3].

Согласно этим работам он не зависит от протяжённости трассы и пространственного разнеса приёмных антенн. Сведения о зависимости от углового положения антенны РЛС в этих работах не приведены.

Для выявления этой зависимости оценивался коэффициент корреляции временных флуктуаций огибающей выходного сигнала одной антенны и флуктуаций разности фаз между сигналами пары антенн, а затем вычислялся этот же коэффициент для флуктуаций огибающей выходного сигнала другой антенны. Получаемые коэффициенты корреляции отличались незначительно, поэтому определялся средний коэффициент временной корреляции флуктуаций огибающих принимаемых сигналов и флуктуаций разности фаз между ними  $r_{\Delta\psi,E}$ .

Примеры средних по совокупности трасс коэффициента корреляции (сплошная линия) огибающей и разности фаз  $r_{\Delta\psi,E}$  в зависимости от углового положения антенны РЛС приведены на рис. 7. Пунктиром показаны среднеквадратические значения  $r_{\Delta\psi,E}$  по совокупности трасс.

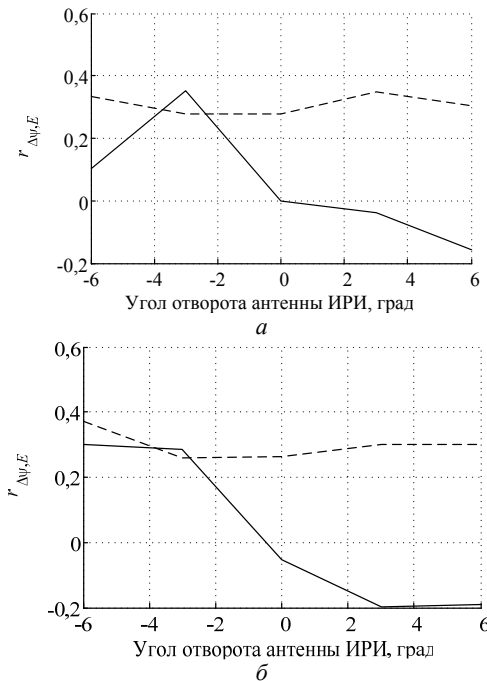


Рис. 7. Средний по всем трассам коэффициент корреляции огибающей и разности фаз между выходными сигналами антенн с пространственным разнесом в зависимости от углового положения передающей антенны относительно направления на приёмный пункт: *а* –  $30\lambda$ ; *б* –  $6\lambda$

Усреднённый по всем трассам модуль коэффициента  $r_{\Delta\psi,E}$  с отворотом луча передающей антенны от направления на приёмный пункт имеет тенденцию к возрастанию. Это может быть объяснено возрастанием вклада отражённых сигналов от объектов, расположенных в стороне от линии «РЛС – приёмный пункт» в сравнении с вкладом излучённого сигнала. Изменение во времени параметров отражённых сигналов приводит к значительным изменениям во времени одновременно для огибающей и разности фаз принимаемых сигналов. Это обуславливает увеличение коэффициента  $r_{\Delta\psi,E}$ .

Зависимость коэффициента  $r_{\Delta\psi,E}$  от углового положения антенны РЛС хорошо согласуется с зависимостью этого коэффициента от угловой расстройки [3], поскольку она связана с изменением центра тяжести углового энергетического спектра рассеянных волн при повороте луча антенны РЛС.

Коэффициент корреляции огибающей и разности фаз по совокупности исследуемых трасс распространения изменялся в пределах  $\pm 0,9$  и от пространственного разнеса приёмных антенн изменяется мало. Представленные значения коэффициента  $r_{\Delta\psi,E}$  при наведённой антенне РЛС на приёмный пункт согласуются с результатами из [1–3]. Разброс оценок коэффициентов корреляции огибающей и разности фаз может быть объяснён различным расположением и типом отражателей на радиотрассе.

Средний по совокупности трасс интервал корреляции огибающей и разности фаз близок к нулю и не зависит от протяжённости радиотрассы. Это согласуется с результатами, приведёнными в работах [1–3].

По коэффициенту корреляции огибающей и разности фаз при достаточно большом отношении мощности сигнала РЛС к мощности рассеянного сигнала можно грубо оценить, отвернут ли луч антенны РЛС относительно направления на приёмный пункт.

#### Выводы

Результаты обработки экспериментальных данных позволяют сделать следующие выводы:

1. Полученные в данной работе экспериментальные оценки интервалов стационарности, интервалов временной корреляции огибающей и разности фаз принимаемых сигналов дополняют известные закономерности этих характеристик от протяжённости трассы и углового положения антенны передатчика относительно пункта приёма. Наблюдается некоторое расхождение с ранее известными результатами:

- для огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн и разности фаз между ними интервал временной корреляции от отворота антенны РЛС меняется незначительно;
- интервал временной корреляции разности фаз выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн незначительно зависит от пространственного разнеса приёмных антенн от  $6\lambda$  до  $30\lambda$ ;
- отсутствует зависимость интервалов временной корреляции огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн и разности фаз между ними от протяжённости исследуемых трасс.

Эти характеристики следует учитывать при разработке алгоритмов пеленгования источников радиоизлучения или алгоритмов квазикогерентного накопления сигналов.

2. Интервал наблюдения принятых сигналов определяет доминирование того или иного механизма искажений радиоволн, приводящего к флуктуациям огибающих принимаемых сигналов и разности фаз между ними на наземных пересечённых трассах прямой видимости и дифракции. По временным

реализациям огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн и разности фаз между ними длительностью 10 с определены интервалы стационарности, на которых флуктуации огибающей и разности фаз могут быть вызваны преимущественно флуктуациями диэлектрической проницаемости тропосферы или беспорядочным перемещением «блестящих» точек отражателей. На десятисекундных интервалах значительные изменения (тренды) огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн и разности фаз между ними могут быть вызваны перемещением в некотором преимущественном направлении групп «блестящих» точек элементов рельефа местности. В среднем интервалы стационарности огибающих принятых сигналов составляют 0,1 с, а интервалы стационарности разности фаз имеют длительность порядка 0,2 с.

3. С отворотом антенны передатчика относительно пункта приёма интервал временной корреляции огибающих выходных сигналов пространственно разнесённых приёмных антенн уменьшается, а интервал временной корреляции разности фаз этих сигналов, напротив, увеличивается.

4. Модуль коэффициента корреляции огибающей и разности фаз с отворотом луча передающей антенны от направления на приёмный пункт имеет тенденцию к возрастанию. По значению коэффициента корреляции при достаточно большом отношении мощности сигнала РЛС к мощности рассеянного сигнала можно грубо оценить, отвернут ли луч антенны РЛС относительно направления на приёмный пункт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-38-60091 мол\_а\_дк.

#### Литература

1. Денисов В.П. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 502 с.
2. Шарыгин Г.С. Экспериментальное исследование структуры электромагнитного поля при распространении радиоволн сантиметрового диапазона над земной поверхностью. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1970. – 127 с.
3. Шарыгин Г.С. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. – М.: Радио и связь, 1983. – 140 с.
4. Денисов В.П. Экспериментальные данные об амплитудных и фазовых искажениях импульсных сигналов, принятых в различных точках на короткой открытой трассе / В.П. Денисов, М.В. Крутиков, М.В. Осипов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 12–18.
5. Калинин А.И. Исследования распространения УВК до расстояния порядка прямой видимости / А.И. Калинин, Л.В. Надененко // Распространение радиоволн. – М.: Наука, 1975. – 66 с.
6. Аникин А.С. Анализ зависимости разности фаз на антеннах фазового радиопеленгатора от ориентации направленной антенны источника радиоизлучения в условиях пересечённой местности / А.С. Аникин, В.П. Денисов, М.В. Крутиков, Н.А. Колядин // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 2 (28). – С. 5–13.

7. Аникин А.С. Анализ аномальных ошибок пеленгования фазовым методом на наземных трассах / А.С. Аникин, В.П. Денисов // Матер. науч.-техн. конф. «Научно-технические проблемы в промышленности: научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий». – СПб., 2012. – С. 101–108.

8. Колядин Н.А. Статистические характеристики внутриимпульсных пространственно-временных флуктуаций разности фаз на приземных трассах // Матер. науч.-техн. конф. «Научно-технические проблемы в промышленности: инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий». – СПб., 2012. – С. 153–159.

9. Ровкин М.Е. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временных искажений радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах / М.Е. Ровкин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков, М.В. Осипов, В.А. Зайцев, Е.Ю. Бутырин // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 7–11.

10. Шифрин Я.С. Экспериментальное исследование некоторых вопросов дальнего тропосферного распространения радиоволн 10 см диапазона // Электросвязь. – 1964. – №8. – С. 1–8.

11. Мухомор К.Е. Корреляционные функции флуктуаций огибающей импульсных сигналов, прошедших наземную трассу РРВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://kpfu.ru/staff\\_files/F806936568/04\\_Sekciya.2.pdf](http://kpfu.ru/staff_files/F806936568/04_Sekciya.2.pdf), свободный (дата обращения: 07.21.2016).

12. Колядин Н.А. Внутриимпульсные характеристики разности фаз сантиметровых радиосигналов, принятых на наземных трассах / Н.А. Колядин, Е.Н. Грицаенко, М.В. Крутиков // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем. – Ульяновск, 2007. – С. 151–153.

#### Аникин Алексей Сергеевич

Канд. техн. наук, ассистент каф. радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-38-98  
Эл. почта: rbk@sibmail.com

#### Крутиков Михаил Владимирович

Зав. лаб. распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-39-69.  
Эл. почта: rwplab@sibmail.com

Anikin A.S., Krytikov M.V.

#### Temporal properties of centimeter RF signals, which transmitted through cross-over terrestrial track

For signals received by spaced antennas we analyzed the time realizations and phase shifts on 10-seconds intervals. The experimental estimations for envelope and phase shift stationarity intervals, relation between envelope and phase shift time correlation interval and antenna angular position, and envelope and phase shift cross-correlation coefficient are shown. The achieved properties were compared to previously published results.

**Keywords:** experimental results, envelope, phase shift, stationarity interval, correlation coefficient, time correlation interval, statistical properties, antenna angular position, RF emitter.