
ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.37+537.874+537.877

**РЕГИСТРАЦИЯ ФИНИТНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ
В СИГНАЛЬНОМ РАДИОВИДЕНИИ
СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

© 2021 г. М. С. Костин^а, *, Д. С. Воруничев^а

^аМИРЭА – Российский технологический университет,
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

*E-mail: kostin_m@mirea.ru

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

После доработки 16.09.2020 г.

Принята к публикации 04.03.2021 г.

Разработан метод спектрально-временной рекуперации нестационарных полей сверхкоротких радиоимпульсов, волновая конфигурация которых составляет аутентификаторы радиоизображений в сигнальном радиовидении субнаносекундного разрешения. Показано, что технология спектрально-временной рекуперации одиночного радиоотклика заключается в генерации идентичной серии импульсов и достигается путем его последовательного пропуска через усилитель, охваченный петлей запаздывающей обратной связи. Построена и проанализирована параметрическая модель стробоскопического рециркулятора и исследованы условия его устойчивости. Дана статистическая оценка воспроизводимости радиооткликов с учетом влияния параметрических условий режима рециркуляции, а также стационарных шумов и итерационной аттенюации. Спроектирован экспериментальный образец микрополоскового модуля рециркулятора, генерирующего импульсно-выборочную последовательность по финитному радиоотклику заданной конфигурации. Показано, что наилучшим отношением сигнал–шум, при котором диапазон итераций лежит в интервале 15...20, является 9 дБ и более.

DOI: 10.31857/S0033849421090072

ВВЕДЕНИЕ

Переход к сигнальному радиовидению субнаносекундного разрешения при помощи нестационарных сверхкоротких импульсов (СКИ) сопровождается необходимостью решения научной проблемы регистрации и идентификации сигнального профиля финитных полей СКИ, составляющих высокоточные радиоизображения в сигнальном радиовидении. Безусловно, это позволяет принципиально улучшить показатели аутентификации собственно томографического радиовидения не только за счет получения информации о импедансной профилограмме, но и о импульсных характеристиках облучаемых объектов и неоднородных сред через волновые деформации СКИ, скрытых в его рассеянной конфигурации.

Как известно, в широко применяемых методах радиотомографии используют методы, основанные на принципах регистрации векторного распределения интенсивностей и пространственно-временных задержек обратно рассеянного поля, применяя СКИ исключительно в целях обеспечения пространственного разрешения регистрации распределения волнового импеданса облачаемой

среды без фиксирования каких-либо изменений в волновой конфигурации самого профиля СКИ [1]. В то же время аутентификаторы различных объектов, определяемые реперными неоднородностями материальной среды, составляющей их структуру, скрыты именно в волновых деформациях поля СКИ. При этом волновые профили сигнальных радиоизображений различных объектов способны иметь достаточно сложные, но схожие огибающие, что определенно вводит все основания на ограничение аутентификации объектов по огибающим СКИ в сигнальном радиовидении и требует регистрации фактического профиля СКИ радиоизображения.

Действительно, сочетание сигнального и томографического методов позволит существенно расширить информативные возможности активного радиовидения благодаря возможности регистрации и идентификации волновых деформаций СКИ. Таким образом, актуальность представленной научной работы обусловлена необходимостью разработки и совершенствования радиотехнических методов и средств регистрации и идентификации СКИ-сигналов нестационарной конфигурации, основанных на получении информации об

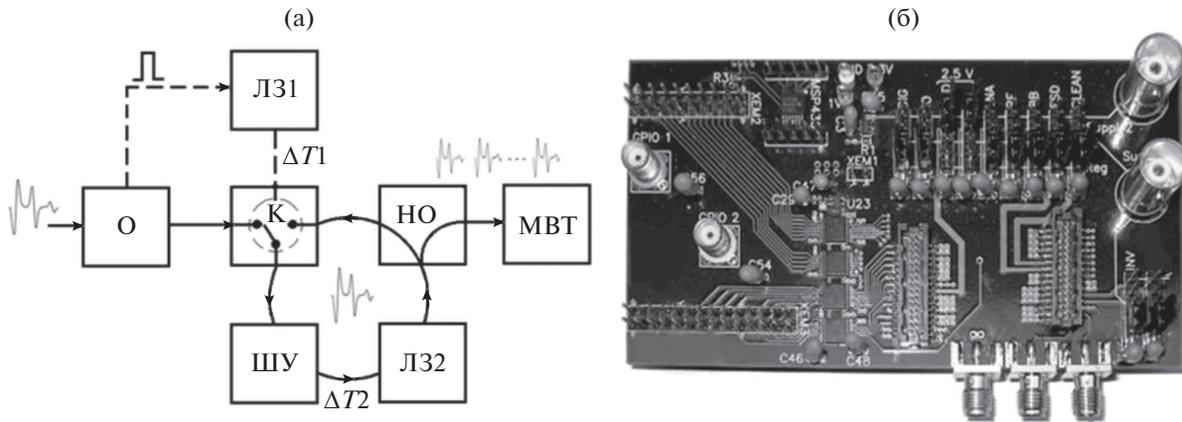


Рис. 1. Структурная схема стробоскопического SKI-рециркулятора (а): О – обнаружитель, ЛЗ1 – линия задержки управления ключа, К – быстродействующий ключ, ШУ – широкополосный усилитель, НО – направленный ответитель, ЛЗ2 – линия задержки петли обратной связи. Опытный образец (б).

объектах, содержащейся в волновых деформациях рассеянного SKI. Так же становится актуальным решение проблемы достижения субнаносекундного разрешения при регистрации квазифинитных SKI полей нестационарной конфигурации, требующего не менее 25% относительной полосы пропускания и пикосекундного быстродействия изделий твердотельных модулей СВЧ, способных аппаратно обеспечить высокоточную воспроизводимость SKI [1, 2]. Эта проблема является не менее важной практической радиотехнической задачей, особенно применительно к быстропротекающим радиоволновым процессам, поскольку высокоточная регистрация параметров нестационарных сред в прикладных задачах радиофизики, так же как и радиоизображений в радиовидении, не всегда позволяет использовать сквозную последовательность радиоимпульсов для восстановления SKI [2].

В работе решение проблемы регистрации квазифинитных SKI-полей радиоизображений предлагается найти путем применения рециркуляции одиночных радиоимпульсов на основе метода спектрально-временной рекуперации SKI с усиленно-задержанной обратной связью [1, 3].

1. СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ РЕКУПЕРАЦИЯ SKI

Технология спектрально-временной рекуперации SKI заключается в генерации идентичной серии импульсов и достигается путем его последовательного пропускания через широкополосный усилитель (ШУ), охваченный петлей запаздывающей обратной связи [1, 4]. Элемент запаздывания, реализуемый коаксиальной линией задержки (ЛЗ), необходимым для временного разделения SKI, совершающего требуемое число проходов через нелинейный элемент с заданным периодом следования. При этом предложенная технология мо-

жет быть универсально реализована для любого из известных практических решений масштабновременной трансформации (МВТ) SKI [1, 4]. На рис. 1 представлена структурная схема стробоскопического SKI-рециркулятора с усиленно-задержанной обратной связью и его опытный образец соответственно.

Поясним принцип действия SKI-рециркулятора. Сигнал SKI $U_{вх}$, принятый и обработанный устройством обнаружения, поступает на быстродействующий ключ К, а сигнал обнаружения – на линию задержки ЛЗ1, равной длительности SKI ΔT_1 . После того, как SKI-сигнал приходит на вход ШУ, через время ΔT_1 быстродействующий ключ изменит свое состояние. При этом одна часть усиленного $U_{ввых}$ SKI-сигнала $U_{МВП}$ от направленного ответителя НО поступает на устройство МВТ, а другая – на линию задержки ЛЗ2, задерживается на время $\Delta T_2 > \Delta T_1$, после чего через замкнутый ключ попадает на ШУ, и далее процесс повторяется в заданном цикле.

Так, пренебрегая потерями, нелинейными искажениями, шумами, а также влиянием эффекта самовозбуждения, считая режим SKI-рециркуляции устойчивым, можно предположить, что число циклов рекуперации SKI будет носить бесконечный характер, а модель рециркулятора может быть представлена системой выражений:

$$\left. \begin{aligned} U_{ввых} &= U_{вх} K_{ШУ} \\ U_{вх} &= \frac{U_{ввых}}{K_{НО}} \\ U_{ввых} &= U_{вх} + U_{МВП} \end{aligned} \right\} U_{МВП} = U_{вх} (K_{ШУ} - 1), \quad (1)$$

где $K_{ШУ}$ – коэффициент передачи ШУ, не охваченного обратной связью, $K_{НО}$ – коэффициент передачи плеча обратной связи НО. Причем для случая $K_{ШУ} = K_{НО}$, последовательность SKI

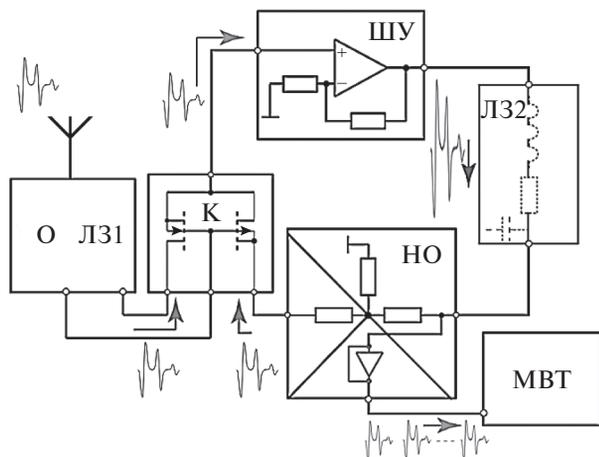


Рис. 2. Функциональная схема СКИ-рециркулятора.

$U_{\text{МВТ}}$ на выходе ответвителя носит стабильный динамический характер, повторяясь с периодичностью ΔT_2 . Однако на практике не представляется возможным обеспечить условие равенства $K_{\text{ШУ}} = K_{\text{НО}}$, вследствие чего неизбежно возникает сложность поддержания последовательности СКИ неизменного уровня, что может привести к насыщению ШУ, когда $K_{\text{ШУ}} > K_{\text{НО}}$, либо к последовательной аттенюации радиоимпульса, когда $K_{\text{ШУ}} < K_{\text{НО}}$, что ограничивает число циклов рециркуляции. Данный недостаток может быть компенсирован введением в схему стробоскопического рециркулятора ШУ отслеживающей цепи с автоматической регулировкой усиления [5].

1.1. Параметрическая модель стробоскопического СКИ-рециркулятора

Проанализируем функциональные особенности стробоскопического СКИ-рециркулятора, схема которого представлена на рис. 2.

Широкополосный усилитель является ключевым устройством рециркулятора, от характеристик которого зависят радиотехнические характеристики устройства, поскольку качественным показателем ШУ является точность воспроизведения профиля исходного СКИ [5]. Для рециркулятора критичными являются как линейные искажения, обусловленные зависимостью модуля коэффициента усиления, фазового сдвига между входным и выходным сигналом от частоты входного сигнала, так и нелинейные – искажения, обусловленные влиянием нелинейных характеристик системы, ведущими к появлению в выходном СКИ высших гармоник. Если высшие гармонические составляющие не попадают в частотную область СКИ-сигнала, их легко подавить выходной фильтрацией. Однако если высшие составляющие

форманты лежат вблизи рабочей частоты ШУ, то уменьшить уровень их влияния не всегда представляется эффективно возможным. Поэтому для минимизации влияния искажений и обеспечения высокой линейности передаточной характеристики в ШУ вводятся дополнительные цепи линейризации. При этом важно отметить, что обеспечение равномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ШУ в заданной полосе функции спектральной плотности мощности СКИ – очень важный параметр. Так, форма СКИ на выходе ШУ, будет отличаться от профиля СКИ в случае, если гармонические составляющие будут усиливаться с разным коэффициентом усиления $K_{\text{ШУ}}$, а также если фазовые сдвиги, вносимые ШУ, будут различными для отдельных гармоник, т.е. изменения формовременного профиля СКИ на выходе рециркулятора в этом случае будет связано с частотными и фазовыми искажениями. Действительно, искажения в ШУ связаны с частотной зависимостью $K_{\text{ШУ}}$, поскольку АЧХ реальных ШУ имеет неравномерную зависимость от частоты [1, 5]. Так, уменьшение $K_{\text{ШУ}}$ на нижних границах частотного диапазона обусловлено возрастанием входного импеданса ШУ за счет увеличения реактивного емкостного сопротивления во входных каскадах, в то время как снижение $K_{\text{ШУ}}$ в области верхних границ частотного диапазона обусловлено влиянием паразитных емкостей активных нелинейных элементов и межэлементных соединений, шунтирующих СКИ [1, 5].

Для количественной оценки частотных искажений, вносимых ШУ, в работе используется коэффициент частотных искажений $\zeta_{\text{ч}} = \bar{K}_{\text{ШУ}} / K_{\text{ШУ}}$, где $\bar{K}_{\text{ШУ}}$ – усредненный коэффициент усиления в средней полосе рабочих частот, а $K_{\text{ШУ}}$ – коэффициент усиления на заданной частоте. Наряду с частотными искажениями в ШУ возможны фазовые искажения, которые не влияют на спектральный состав СКИ, но являются причиной изменения профиля СКИ в результате фазовых сдвигов, что недопустимо при решении задач радиовидения.

В отличие от линейных фазочастотных искажений, вносимых рециркулятором, нелинейные искажения связаны с появлением дополнительных частотных гармоник, также искажающих форму профиля СКИ. Величина нелинейных искажений при тестировании СКИ-рециркулятора оценивается коэффициентом нелинейных искажений или коэффициентом гармоник [1, 5]

$$K_{\text{г}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_N^2}{U_1^2}}$$

Одним из известных способов математической интерпретации нелинейных систем является

представление нелинейной характеристики полиномом вида

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_1 U_{\text{ВХ}} + K_2 U_{\text{ВХ}}^2 + K_3 U_{\text{ВХ}}^3 + \dots + K_N U_{\text{ВХ}}^N,$$

где K_1, K_2, \dots, K_N – весовые коэффициенты. Отсюда нелинейные искажения, вносимые ШУ, будут зависеть не только от линейных коэффициентов, но и от более высоких составляющих входного сигнала. Поэтому нелинейные искажения СКИ могут проявиться как в возникновении дополнительных гармонических составляющих, так и в изменении соотношения амплитуд гармоник, что может привести к вырождению СКИ на выходе рециркулятора уже на первой декаде дробной итерации [6]. Следует также отметить, что между линейными и нелинейными искажениями существует связь, несмотря на различную природу их происхождения. Кроме того, в зависимости от частотных характеристик в многокаскадных ШУ нелинейные искажения (высшие гармоники), появившиеся в одном из каскадов, могут быть либо чрезмерно усилены, либо частично подавлены [6].

Важными также являются шумовые характеристики ШУ. Когда собственный шум ШУ накладывается на усиливаемый СКИ, отделить их друг от друга уже не представляется возможным [1, 6]. Так, внешние шумы, естественным образом подмешенные к СКИ, проходя итерацию за итерацией рециркуляции, при каждом цикле также усиливаются с добавлением собственных шумов ШУ. Поэтому при синтезе и исследовании рециркулятора необходимо обеспечить снижение собственных шумов ШУ. С практической точки зрения для описания рециркулятора особый интерес представляет коэффициент шума $\xi_{\text{ш}}$, характеризующий ухудшение ОСШ при прохождении сигнала через ШУ:

$$\xi_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ВХ}}/N_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}/N_{\text{ВЫХ}}} = \frac{P_{\text{ВХ}} N_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} N_{\text{ВХ}}} = \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{K_{\text{ШУ}} N_{\text{ВХ}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ВЫХ}}, N_{\text{ВХ}}$ – средняя мощность выходного и входного шума ШУ, соответственно; $P_{\text{ВЫХ}}, P_{\text{ВХ}}$ – средняя мощность выходного и входного СКИ ШУ соответственно.

В реальных ШУ $\xi_{\text{ш}} > 1$, так как ШУ обязательно вносит собственный шум [7]. Так, для первого прохождения СКИ через ШУ (цепь обратной связи не участвует; СКИ проходит через ШУ в первый раз) выходной шум $N'_{\text{ВЫХ}}$ можно представить как $N'_{\text{ВЫХ}} = \xi_{\text{ш}} N'_{\text{ВХ}} + N_{\text{ШУ}}$, где $N_{\text{ШУ}}$ – собственный шум ШУ не охваченного петлей обратной связи, $N'_{\text{ВХ}}$ – шум на входе ШУ.

Для первой итерации (часть энергии СКИ первый раз передается по цепи обратной связи с выхода на вход ШУ; в импульсной последовательно-

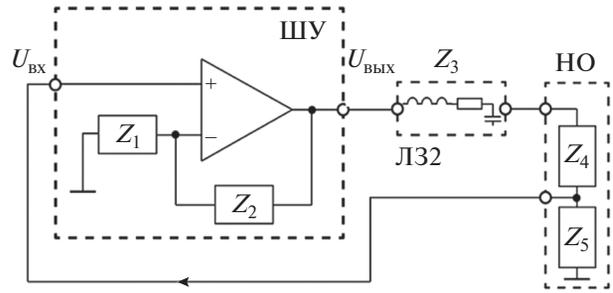


Рис. 3. Эквивалентная схема анализа устойчивости стробоскопического СКИ-рециркулятора.

сти на выходе рециркулятора формируется второй СКИ) выходной шум $N''_{\text{ВЫХ}}$ можно определить как

$$N''_{\text{ВЫХ}} = \frac{K_{\text{ШУ}}}{K_{\text{НО}}} (K_{\text{ШУ}} N'_{\text{ВХ}} + N_{\text{ШУ}}) + N_{\text{ШУ}} + K_{\text{ШУ}} (N_{\text{К}} + N_{\text{НО}} + N_{\text{ЛЗ}}),$$

где $N_{\text{К}}$ – шумы перекидного ключа, $N_{\text{НО}}$ – тепловой шум НО, $N_{\text{ЛЗ}}$ – тепловой шум коаксиальной ЛЗ. Отсюда коэффициент шума рециркуляции (ШРЦ) $\xi_{\text{ШРЦ}}$ за N итераций для $\xi_{\text{ШУ}} > 1$ будет иметь вид

$$\xi_{\text{ШРЦ}} = \xi'_{\text{ш}} + \frac{\xi'_{\text{ш}} - 1}{K_{\text{ШУ}} - 1} \left(1 - \frac{1}{K_{\text{ШУ}}} \right)^{N-1}, \quad (3)$$

где

$$\xi'_{\text{ш}} = 1 + \frac{1}{K_{\text{ШУ}} N'_{\text{ВХ}}} [N_{\text{ШУ}} + K_{\text{НО}} (N_{\text{К}} + N_{\text{НО}} + N_{\text{ЛЗ}})] -$$

коэффициент шума первой итерации. Отсюда следует, что чем выше коэффициент усиления ШУ и ниже собственные шумы элементов схемы, тем выше отношение сигнал-шум (ОСШ). Кроме того, важно отметить, что для СКИ-рециркулятора коэффициент шума – динамическая характеристика [1, 7].

1.2. Анализ устойчивости стробоскопического СКИ-рециркулятора

Усиленно-задержанная обратная связь в СКИ-рециркуляторе носит положительный характер, а потому синтез такого устройства предполагает оценку его устойчивости к самовозбуждению [1, 7]. Причем внутренние и внешние паразитные обратные связи также необходимо учитывать. Так, на рис. 3 представлена эквивалентная схема рециркулятора, охваченного двумя типами обратной связи: отрицательной и положительной.

Режим работы рециркулятора считается устойчивым при двух условиях: если выполняется неравенство $|\tilde{K}_{\text{ШУ}} \gamma| \geq 1$ и дополнительный фазо-

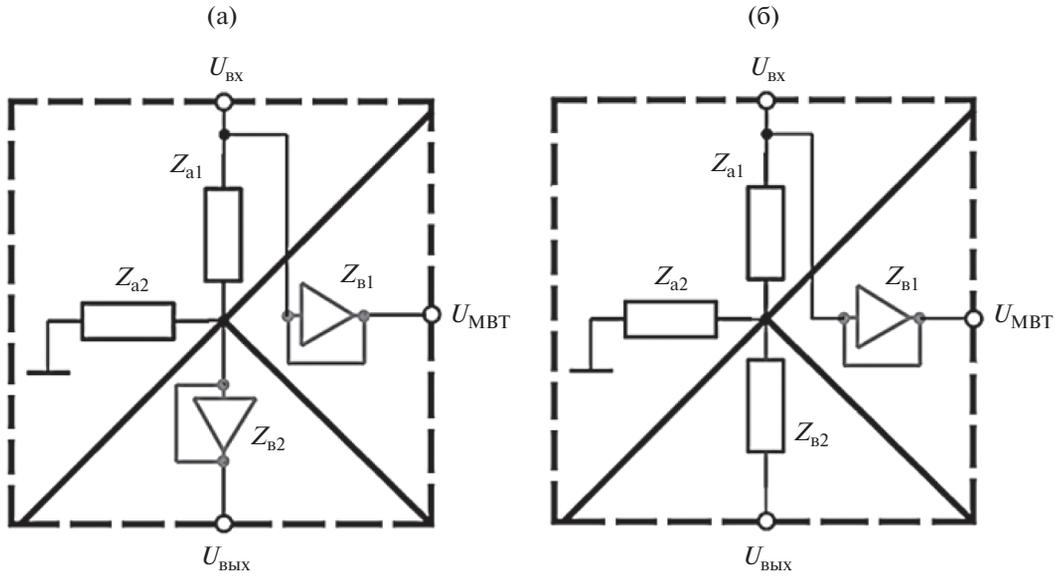


Рис. 4. Эквивалентные схемы направленных ответвителей: АНО (а) и ГНО (б).

вый сдвиг $\varphi > 180^\circ$, либо если выполняется неравенство $|\tilde{K}_{ШУ}\gamma| < 1$ для $\varphi < 180^\circ$. Здесь $\tilde{K}_{ШУ}$ – коэффициент усиления ШУ без обратной связи, а

$$\gamma = \frac{z_1 \parallel z_{ВХ}}{z_2 + z_1 \parallel z_{ВХ}} = \frac{z_1 z_{ВХ}}{(z_1 + z_{ВХ}) \left(z_2 + \frac{z_1 z_{ВХ}}{z_1 + z_{ВХ}} \right)}$$

– коэффициент обратной связи, где $z_{ВХ}$ – входной импеданс ШУ, z_1, z_2 – импедансы цепи обратной отрицательной связи соответственно. Полагая коэффициент обратной связи частотно независимым и $z_{ВХ} \gg z_1$ для $\varphi \geq 180^\circ$, получим первое условие устойчивости

$$\left| \tilde{K}_{ШУ} \frac{z_1}{z_1 + z_2} \right| < 1.$$

Таким образом, коэффициент обратной связи, выраженный через импедансы сосредоточенных параметров схемы СКИ-рециркулятора

$$\gamma_{ПЦ} = \frac{z_5}{(z_3 + z_4 + z_5)},$$

где z_4, z_5 – импедансы плеч делителя на выходе рециркулятора, z_3 – импеданс паразитных параметров топологии и элементов цепей, в том числе ЛЗ. Если коэффициент усиления $\tilde{K}_{ШУ}$ равномерен во всем диапазоне частот и $z_4 + z_5 \gg z_3$, тогда второе условие устойчивости

$$\tilde{K}_{ШУ} \frac{z_5}{(z_4 + z_5)} < 1 \Rightarrow \frac{\tilde{K}_{ШУ}}{K_{НО}} < 1.$$

Импеданс Z_3 паразитных параметров в цепи обратной связи определяется как

$$\begin{aligned} z_3 &= (R_{ЛЗ} + j\omega L_{ЛЗ}) \parallel \frac{1}{j\omega C_{ЛЗ}} = \\ &= \frac{(R_{ЛЗ} + j\omega L_{ЛЗ})}{j\omega C_{ЛЗ} (R_{ЛЗ} + j\omega L_{ЛЗ} + 1/j\omega C_{ЛЗ})}, \end{aligned}$$

где $R_{ЛЗ}$ – омическое сопротивление кондукторов цепи и ЛЗ, $X_C = 1/j\omega C_{ЛЗ}$ – емкостная составляющая, $X_L = j\omega L_{ЛЗ}$ – индуктивная составляющая. При этом с увеличением частоты X_C шунтирует плечи делителя и совместно с X_L увеличивает коэффициент деления. В результате коэффициент деления в области верхних частот получается выше, чем в области нижних.

Быстродействующий ключ в схеме устройства рециркулятора обеспечивает режим замыкания СКИ-сигнала в контур цепи обратной связи и реализуется на паре КМОП-транзисторов, включенных по схеме с общим затвором либо с идентичным типом проводимости. При этом ключ должен переключить плечо в момент времени T_K с таким быстродействием $T_{ВКЛ}$, чтобы выполнялось условие

$$\Delta T_1 < T_K + T_{ВКЛ} < \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

Реализация НО в схеме СКИ-рециркулятора может быть представлена тремя типами: активный НО (АНО), пассивный (ПНО) и гибридный (ГНО). Основным отличием АНО от ПНО является наличие в первом ШУ, включенного по схеме буфера (рис. 4).

Так, достоинством схемы АНО является отсутствие зависимости коэффициента деления НО $K_{НО}$ от входных параметров цепей МВП за счет включения ШУ в режиме повторителей с низкими выходными импедансами $z_{в1}$ и $z_{в2}$. При этом условии

$$K_{НО} = \frac{U_{вх}}{U_{вых}} = \frac{z_4}{z_5} + 1 \approx \frac{R_4}{R_5} + 1,$$

где z_4, z_5 и R_4, R_5 – импедансы плеч резистивного делителя и их омические составляющие соответственно. Однако АНО свойственны те же недостатки, что и ШУ, обусловленные влиянием нелинейных искажений, собственных шумов, необходимостью обеспечения режима устойчивости [1, 7].

Пассивный НО исключает данные недостатки, однако требует корректного согласования как с входными каскадами масштабно-временного преобразователя (МВП), так и с цепями обратной связи рециркулятора. Однако в предложенной схеме рециркулятора предпочтительно использовать ГНО, когда активное плечо, не включенное в цепь задержанной обратной связи, обеспечивает согласование с входными каскадами МВП [8]. Принимая во внимание выражение коэффициента деления АНО, коэффициент для ПНО будет иметь вид

$$K_{НО} = R_4 \frac{R_5 + z_2}{R_5 z_2} + 1.$$

Очевидно, что значение импеданса $z_{в2}$ в рабочей полосе частот будет носить динамический характер и обеспечивать стабильное состояние при условии $R_{a2} \ll Z_{в2}$, для которого

$$K_{НО} \approx \frac{R_4}{R_5} + 1.$$

На минимизацию омического сопротивления плеч НО указывает также зависимость среднеквадратичного значения теплового шума $N_{НО} = \sqrt{4kTR_a \Delta f}$ от сопротивления, где k – постоянная Больцмана, T – температура, $R_{НО} = R_{НО1} + R_{НО2}$ – полное сопротивление плеч НО, Δf – рабочая полоса частот. Действительно, минимальное сопротивление плеч НО не может быть бесконечно малым, так как ограничивается нагрузочной способностью ШУ, а также необходимостью обеспечения режима согласования.

Линия задержки в схеме рециркулятора обеспечивает формирование периода генерации серии идентичной последовательности СКИ на входе МВП. Длина коаксиальной ЛЗ зависит от типа однородной линии и определяется исходя из необходимого времени задержки. Индуктивная и емкостная составляющие импеданса линии за-

держки z_3 влияют на устойчивость ШУ и должны быть минимизированы. К тому же индуктивная составляющая $j\omega L_{ЛЗ}$ влияет на коэффициент деления НО, и с учетом этого получаем

$$K_{НО} = \left(\frac{R_4 + j\omega L_{ЛЗ}}{R_5} \right) + 1.$$

Отсюда для минимизации частотной зависимости и влияния реактивных составляющих ЛЗ на параметры НО необходимо минимизировать паразитные параметры ЛЗ так, чтобы на частоте высшей гармоники СКИ выполнялось неравенство

$$j\omega L_{ЛЗ} + 1/j\omega C_{ЛЗ} \gg R_{a2}.$$

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО СКИ-РЕЦИРКУЛЯТОРА И ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РАДИООТКЛИКОВ

Режим динамической параметризации и отладку рециркулятора наиболее удобно проводить на основе разработанной программной функциональной модели, построенной в среде SciLab Xcos (рис. 5). Так, на выходе формирователя одиночного СКИ (ФОСКИ) длительностью ΔT_1 к сигналу подмешивается аддитивный шум с генератора белого шума (ГБШ) и через управляемый сигналом U_y коммутации ключ (К) поступает на усилитель (У). Далее через цепь НО по возвратному плечу P2 часть энергии СКИ поступает на ЛЗ с временем задержки ΔT_2 , формирующую период следования СКИ. Таким образом, сформированная последовательность СКИ поступает на устройство МВТ (сигнал $U_{вых}$), построенное по схеме строб-фрейм дискретизатора (СФД) [9, 10], а очередной СКИ (сигнал $U'_{вых}$) – возвращается через петлю обратной связи на усилитель для спектрально-временной рекуперации (ключ (К) переведен в нижнее состояние).

Длительность тестового СКИ выбирается исходя из необходимой детализации неоднородностей объекта в радиоинтроскопии или времени переходного радиофизического процесса состояния материальной среды. Пусть длительность СКИ-сигнала $\Delta T_1 \approx 500$ пс, тогда одиночный радиоимпульс без учета потерь и искажений, проходя через СКИ-рециркулятор, от итерации к итерации будет претерпевать многократные повторения.

На рис. 6 показана реализация стробоскопической оцифровки сгенерированной СКИ-последовательности методом МВТ, реализующей принцип импульсно-выборочной последовательности с некоторым периодом $\Delta T_{выб}$. Причем совершенно не обязательно чтобы каждый последующий импульс являлся эффективным для преобразования – эффективным может быть, например, каждый третий или пятый СКИ [9, 10].

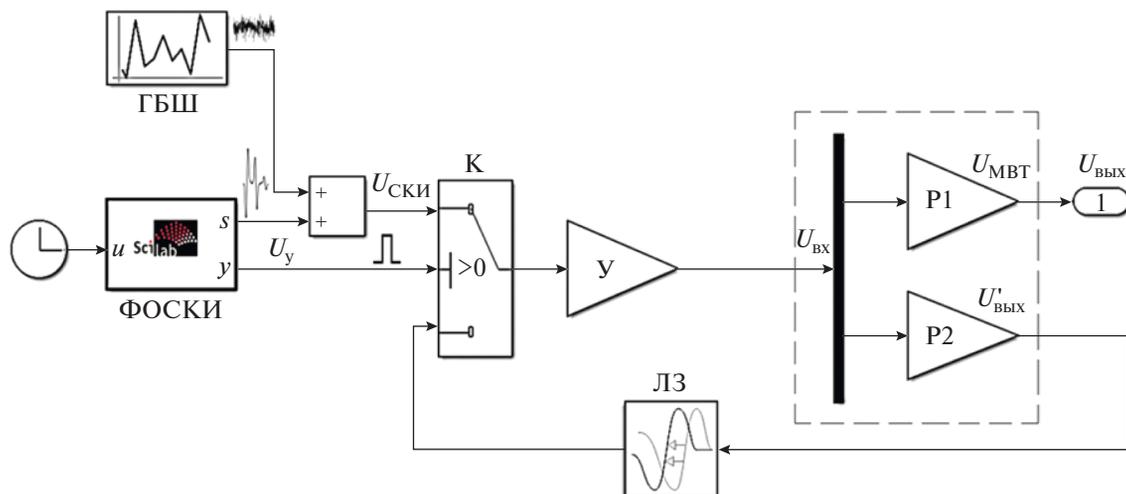


Рис. 5. Функциональная модель стробоскопического СКИ-рециркулятора в среде SciLab Xcos.

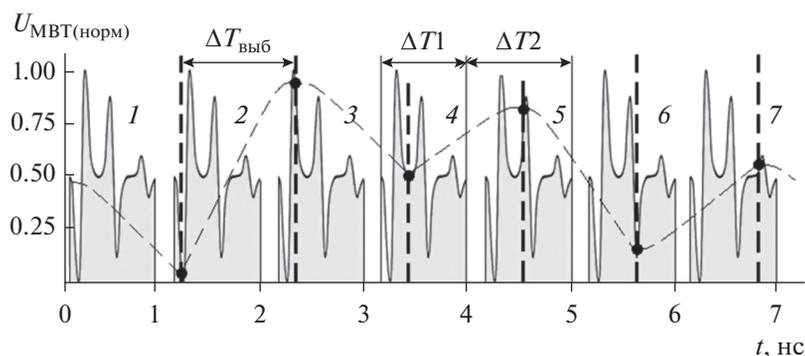


Рис. 6. Формирование рециркулятором СКИ-последовательности и ее регистрация МВП посредством импульсно-выборочной последовательности (1...7 и т.д.)

В то же время оптимальным с позиции минимизации искажений в модели предлагается считать, что эффективен каждый 21-й СКИ для метода импульсно-выборочной последовательности и каждый последующий СКИ – для метода СФД, что исключает режим избыточной рециркуляции. В результате по полученным дискретам возможно стробоскопическое восстановление СКИ (рис. 7) с длительностью на несколько порядков больше принятого радиоимпульса.

Принимая во внимание процесс рециркуляции СКИ, как показано на рис. 6, можно утверждать, что для случая МВТ, реализуемого методом импульсно-выборочной последовательности, шаг временной дискретизации будет зависеть от числа импульсных итераций, в то время как для случая с СФД шаг дискретизации задается постоянным исходя из интервала массива ЛЗ СФД [11] и не зависит от числа импульсной последовательности [11]. Так, например, для обеспечения дискретизации в 30 пс за семь циклов в случае метода импульсно-выбо-

рочной последовательности необходимо формирование выборки из 35 СКИ (эффективным окажется каждый пятый СКИ), в то время как при заданном шаге массива ЛЗ СФД в 25 пс – необходимо всего семь СКИ (семь эффективных импульсных срезов). Именно поэтому СКИ-рециркуляторы наиболее предпочтительны для технологии СФД. Однако МВТ импульсной последовательностью позволяет получить временное сверхразрешение, ограниченное джиттером импульсов выборки для МВТ, что позволяет использовать данный метод при детализированной оценке заданного фрагмента СКИ [12].

2.1. Оценка воспроизводимости радиооткликов с учетом влияния параметрических условий режима рециркуляции

При оценке воспроизводимости восстановления СКИ предлагается использовать два статистических метода: корреляционной оценки (взаимная

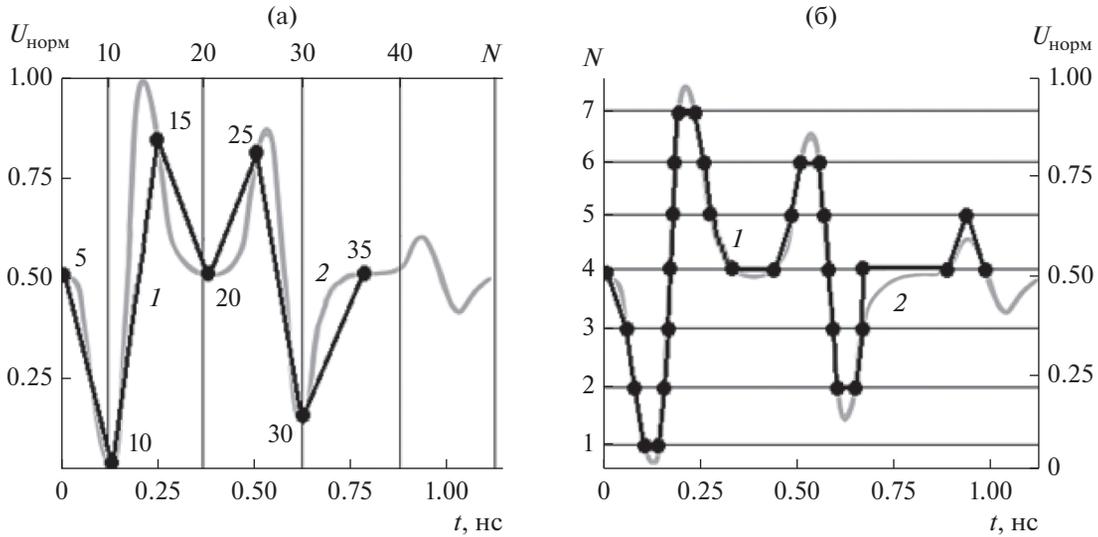


Рис. 7. МВП СКИ за семь импульсных итераций рециркуляции (цифры 5...35) методом импульсно-выборочной последовательности (а) и методом СФД (б): восстановленный СКИ (кривая 1) и принятый СКИ (кривая 2).

корреляционная функция) и среднеквадратической оценки (функционал правдоподобия), а также представление каждого в межинтервальной динамике [1, 3]. При этом в качестве реперного СКИ будем считать априори известным профиль регистрируемого радиоимпульса, принятого и усредненного за N итераций при ОСШ не хуже 20 дБ.

Так, коэффициент взаимной корреляции (ВКР) r принятого и восстановленного СКИ [1, 4]:

$$r = \frac{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)(Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \sum (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (4)$$

где $Y_{1,i}$ – выборки значений принятого (реперного) СКИ; $Y_{2,i}$ – выборки значений восстановленного СКИ,

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{1,i}, \quad \bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{2,i}$$

– средние значения выборок, M – число выборок. Функционал правдоподобия может быть представлен оценкой среднеквадратического отклонения (СКО) вида [1, 4]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [U(i) - \bar{U}(i)]^2}, \quad (5)$$

где $U(i)$ – значения точек выборки реперного СКИ, $\bar{U}(i)$ – среднее арифметическое значение точек выборки восстановленного СКИ.

На рис. 8 представлены зависимости функций ВКР и СКО восстановленного СКИ от числа ите-

раций рециркуляции при 100-кратной выборке для МВТ импульсно-выборочной последовательностью и при помощи технологии СФД.

Анализируя полученные зависимости, показанные на рис. 8, можно судить о эффективном числе итераций рециркуляции СКИ с заданным статистическим показателем воспроизводимости [12, 16]. Так, например, для $r \geq 0.9$ и $\sigma \leq 0.08$ при МВТ, реализуемого импульсно-выборочной последовательностью, эффективное число итераций $N \geq 12$, в то время как для СФД при тех же статистических условиях эффективное число итераций $N \geq 10$. Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что при $N < 15$ технология СФД за счет независимой от числа итераций временного шага дискретизации предпочтительнее МВТ импульсно-выборочной последовательностью.

Важно отметить, что МВТ позволяет получить одинаковые показатели воспроизводимости СКИ при его разбиении на интервалы, что невозможно добиться посредством других технологий, в том числе средствами мультиплексирования на базе аналого-цифрового преобразователя реального времени [5]. Проведем разбиение восстановленного при помощи технологии СФД СКИ на восемь равных интервалов, полагая, что в фрейм-дискретизаторе для формирования фрейма задействовано 42 счетчика, а шаг ЛЗ – 12 пс (рис. 9).

Анализируя зависимости на рис. 9б, можно заметить, что для числа итераций более 20 динамический характер межинтервальных оценок ВКР

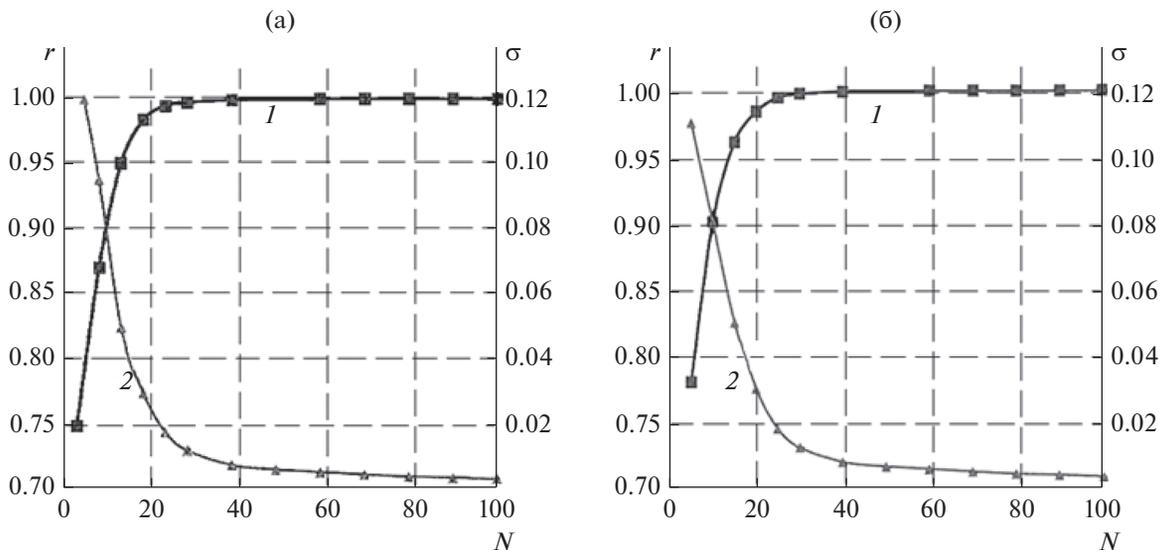


Рис. 8. Зависимости функций ВКР (r , кривая 1) и СКО (σ , кривая 2) восстановленного СКИ от числа итераций рециркуляции: а) для МВП импульсно-выборочной последовательностью; б) с помощью технологии СФД.

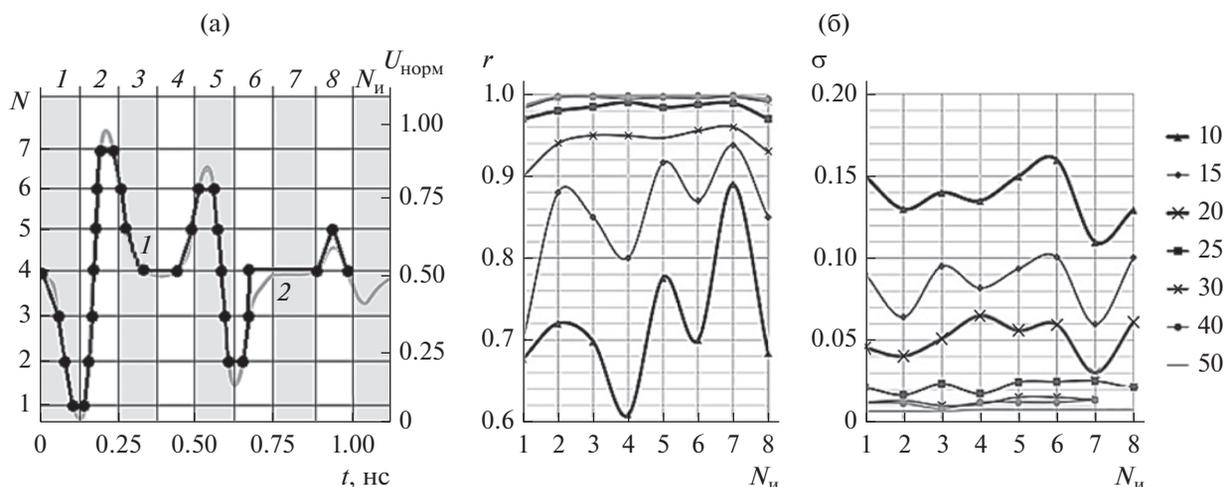


Рис. 9. Реализация интервальной оценки воспроизводимости СКИ: а) разбиение восстановленного СКИ на восемь равных интервалов (1...8 на верхней оси), кривая 1 – реализация принятой выборки, кривая 2 – интерполированный сигнал, полученный с сигнала 1, б) зависимость функций ВКР (r) и СКО (σ) от порядкового номера интервала СКИ N_i при 10, 15, ..., 50 итерациях рециркуляции.

на всех интервалах удовлетворяет условию $r \geq 0.9$, а СКО – $\sigma \leq 0.1$.

Таким образом, эффективное число итераций рециркуляции СКИ определяется заданным статистическим показателем воспроизводимости. Однако оценку эффективного числа итераций целесообразно проводить при установленном ОСШ. Известно, что для минимизации влияния коэффициента шума необходимо выбирать ШУ с максимально высоким коэффициентом усиления $K_{ШУ}$ и наиболее низким коэффициентом шума $K_{Ш}$. Так, например, для ШУ типа ADL5523 $K_{ШУ} = 21.5$ дБ, $K_{Ш} = 0.8$ дБ [7].

Выходной шум $N_{рц}$ на выходе рециркулятора зависит от числа итераций СКИ и может быть представлен в виде

$$\begin{aligned}
 N_{рц} = & \left(\frac{K_{ШУ}}{K_{НО}} \right)^{I-1} (N_{вх} K_{ШУ} + N_{ШУ}) + \\
 & + N_{ШУ} \frac{1 - \left(\frac{K_{ШУ}}{K_{НО}} \right)^{I-1}}{1 - \frac{K_{ШУ}}{K_{НО}}} + \\
 & + \left(\frac{K_{ШУ}}{K_{НО}} \right)^{I-2} K_{ШУ} (N_{ЛЗ} + N_{НО}),
 \end{aligned} \tag{6}$$

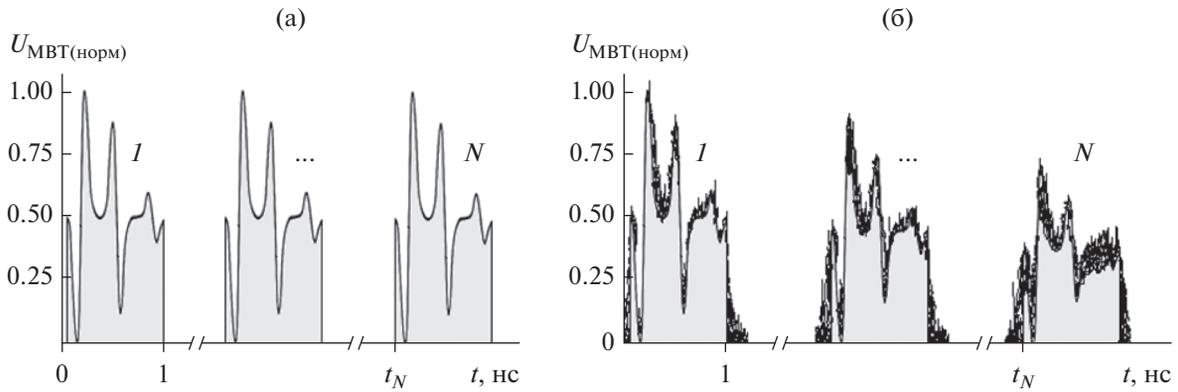


Рис. 10. Формирование рециркулятором SKI-последовательности (1...N): а) без учета влияния шумов и аттенюации; б) при затухании коаксиальной ЛЗ 0.16 дБ/м и ОСШ 12 дБ.

где $I \geq 1$ – заданное число итераций рециркуляции SKI.

При этом коэффициент затухания SKI в коаксиальном коннекторе, задающим цепь ЛЗ, зависит от типа кабеля и увеличивается с ростом частоты, проявляя характер фильтра нижних частот, со спадом 0.16 дБ/м для кабеля типа РК-50-11-13 в рабочем диапазоне частот [1, 5].

Для расчета шумов НО $N_{НО}$ и шумов ЛЗ $N_{ЛЗ}$ необходимо знать активные составляющие их входных импедансов. Так как ЛЗ и НО включены последовательно и $R_{НО} \gg R_{ЛЗ}$, то шумами ЛЗ можно пренебречь. Причем общее сопротивление плеч аттенюатора $R_{НО}$ рассчитывается в соответствии с необходимостью согласования входа и выхода рециркулятора, охваченного цепью обратной связи при помощи коаксиальной ЛЗ с волновым сопротивлением 50 Ом.

При нормальных условиях в полосе $\Delta f_{\Delta T} \approx 2$ ГГц шум НО $N_{НО} \approx 40$ мкВ [1, 5]. Быстродействующий переключатель имеет линейный диапазон работы шире, чем ШУ, поэтому интермодуляционные искажения можно не учитывать. При выходном напряжении ШУ, меньшем допустимого, обеспечивающего работу усилителя на линейном участке, основным элементом, вносимым искажения в SKI, можно считать фильтр, образованный коаксиальной ЛЗ. Аналитически затухание SKI-сигнала в рециркуляторе в зависимости от числа итераций I удобно представить зависимостью вида

$$U(I) = \frac{K_{НО}}{K_{ШУ}} U_1 \exp(-kI), \quad (7)$$

где U_1 – динамический уровень SKI первой итерации, k – коэффициент аттенюации. Отсюда, зная закон аттенюации по передаточным коэффициентам и декременту затухания рециркулятора,

нетрудно получить SKI нивелируемой по уровню генерируемой последовательности [11, 12].

2.2. Оценка воспроизводимости радиооткликов с учетом влияния шумов и аттенюации SKI

Для оценки влияния шумов на характер изменения статистических показателей воспроизводимости в функциональную схему рециркулятора, представленную на рис. 1, в каждый блок модели были введены источники шумов, имитирующие условия итерации при заданном ОСШ. Также в схему добавили фильтр низкой частоты (ФНЧ), имитирующий зависимость затухания SKI от частоты при прохождении SKI-сигнала через ЛЗ [5, 6].

Качественно оценить характер влияния вносимых помех и аттенюации в SKI-рециркулятор для ОСШ 12 дБ можно на примере графиков, представленных на рис. 10.

Количественно оценить влияние шумов на показатели воспроизводимости SKI удобно при построении зависимостей ВКР и СКО от ОСШ для реперных радиоизображений эквивалентных неоднородностей (рис. 11), численная аналитика которых приведена в работе [1, 8]. Как видно из приведенных зависимостей, наилучшим ОСШ, при котором диапазон итераций лежит в интервале 15...20 ($r \geq 0.9$, $\sigma \leq 0.08$), является величина 9 дБ и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования были получены следующие основные выводы.

1. Разработан метод спектрально-временной рекуперации одиночного SKI, заключающийся в генерации идентичной серии импульсов, что достигается путем его последовательного пропус-

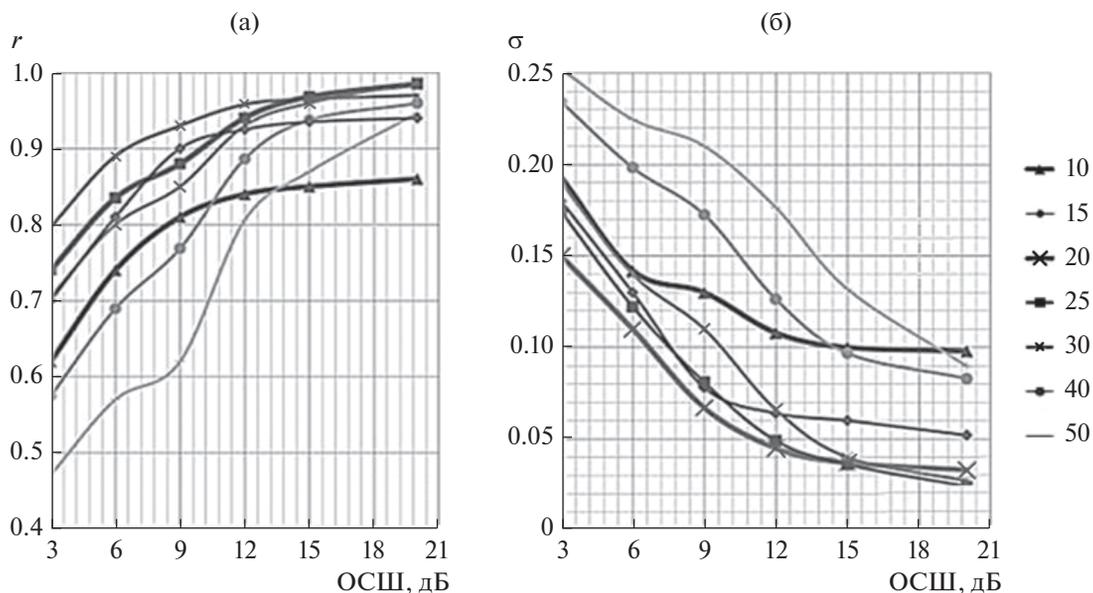


Рис. 11. Показатели оценки воспроизводимости СКИ по ВКР (а) и СКО (б) от ОСШ для разных уровней итерации СКИ: 10...50.

кания через ШУ, охваченного петлей запаздывающей обратной связи.

2. Построены параметрическая и функциональная модели стробоскопического СКИ-рециркулятора и исследованы его основные радиотехнические характеристики: устойчивость к самовозбуждению, частотные и нелинейные искажения. Для анализа устойчивости построена эквивалентная схема стробоскопического СКИ-рециркулятора в среде SciLab Xcos.

3. На основе запатентованного решения СФД спроектирован экспериментальный образец микрополоскового модуля СКИ-рециркулятора, генерирующего импульсно-выборочную последовательность по финитному СКИ заданной конфигурации [11, 12]. Экспериментальный образец прошел апробацию и был успешно использован при создании телеметрической системы радиосенсорной идентификации в работе [13].

4. Установлено, что ШУ в полосе 0.4...3.5 ГГц можно считать линейным и не учитывать фактор его влияния на искажения СКИ, функция спектральной мощности которого лежит в границах указанной спектральной полосы.

5. Получено выражение для коэффициента шума рециркуляции $\xi_{\text{шрц}}$ за N итераций. Показано, что для СКИ-рециркулятора коэффициент шума является динамическим.

6. Установлено, что для случая МВТ, реализуемого методом импульсно-выборочной последовательности, шаг временной дискретизации будет зависеть от числа импульсных итераций, в то время как для случая с СФД шаг дискретизации зада-

ется постоянным, исходя из интервала массива ЛЗ, и не зависит от импульсной последовательности, поэтому СКИ-рециркулятор предпочтительнее для метода СФД.

7. Построены функции зависимости ВКР и СКО от числа итераций рециркуляции. Показано, для каждого метода эффективное число итераций рециркуляции СКИ однозначно определено с заданным статистическим показателем воспроизводимости. Так, например, для обеспечения $r \geq 0.9$ и $\sigma \leq 0.08$ для МВТ, реализуемого импульсно-выборочной последовательностью, эффективное число итераций $N \geq 12$. Для СФД при тех же статистических условиях эффективное число итераций $N \geq 10$. Из полученных зависимостей можно заметить, что для $N < 15$ технология СФД за счет независимой от числа итераций временного шага дискретизации предпочтительнее МВТ импульсно-выборочной последовательностью. Наилучшим ОСШ, при котором диапазон итераций лежит в интервале 15...20 ($r \geq 0.9$, $\sigma \leq 0.08$), является 9 дБ и более.

8. Получено радиотехническое решение научной проблемы регистрации финитных СКИ-радиоизображений, что достигается посредством разработанной технологии их спектрально-временной рекуперации на базе СКИ-рециркулятора с усиленно-задержанной обратной связью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Куликов Г.В., Костин М.С. // Журн. радиоэлектроники. 2019. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/2/text.pdf>.

2. Будагян И.Ф., Костин М.С. // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/5/text.html>.
3. Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В. // РЭ. 2017. № 5. Т. 62. С. 486.
4. Якубов В.П., Шпилов С.Э., Суханов Д.Я. // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 12. С. 8.
5. Костин М.С., Бойков К.А. // Инженерная физика. 2018. № 1. С. 41.
6. Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф. // РЭ. 2019. № 2. Т. 64. С. 191.
7. Костин М.С., Видулов В.М., Тамбовский С.С. // РЭ. 2019. № 2. Т. 64. С. 116.
8. Костин М.С., Севрюгин П.В., Стешин И.А. // Журн. радиоэлектроники. 2019. № 7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/5/text.pdf>.
9. Костин М.С. Субнаносекундные сигналы и технологии: учебное пособие. М.: МИРЭА, 2018.
10. Куликов Г.В., Костин М.С., Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д. // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 5. <http://jre.cplire.ru/jre/may20/3/text.pdf>.
11. Костин М.С. Атактивный строб-фрейм дискретизатор субнаносекундных радиоимпульсов. Пат. РФ № 2685977. Оpubл. 23.04.2019 г. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". 2019. № 12.
12. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративная система спектрально-временной рекуперации сверхкороткоимпульсных сигналов. Пат. РФ № 2710663. Оpubл. 30.12.2019 г. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". 2020. № 1.
13. Куликов А.А. // Росс. технол. журн. 2020. Т. 8. № 3. С. 7. <https://www.rtfj-mirea.ru/jour/article/view/221/203>.
14. Wang X., Dinh A., Teng D. // Ultra Wideband. 2013. № 11. P. 41.