

В. П. Рубан

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

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

E-mail: ruban@ire.kharkov.ua

ДЖИТТЕР СИНХРОНИЗАЦИИ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В подповерхностной радиолокации актуальной становится оценка временной нестабильности синхронизации – джиттера приемника в связи с тем, что это явление влияет на точность регистрации и воспроизведения формы принимаемого сигнала и, соответственно, на эффективность применения алгоритмов цифровой обработки сигналов. Существующий метод оценки джиттера приемника георадара по амплитудным ошибкам преобразованного сигнала не универсален и требует уточнений для преобразователей с неполным зарядом накопительной емкости. В данной работе выполнено моделирование стробоскопического преобразования с временной нестабильностью выборки для случаев полного заряда, когда метод оценки дает корректные результаты, и неполного заряда накопительной емкости; проанализированы соотношения формы вероятностного распределения джиттера и амплитудных ошибок стробпреобразования, а также уровней джиттера, изначально заданных при моделировании и рассчитанных (восстановленных) по известному методу. По результатам моделирования определены границы применимости данного метода. Показано, что прямое применение метода оценки джиттера, верное для преобразователя с полным зарядом, дает неправильные оценки для стробпреобразователя с неполным зарядом накопительной емкости. В связи с этим предложена процедура восстановления амплитуды сигнала, которая позволяет получать корректную оценку джиттера синхронизации приемников георадаров, работающих в режиме неполного заряда накопительной емкости. Ил. 9. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: джиттер, стробоскопическое преобразование, выборка, георадар.

В подповерхностной радиолокации, кроме задач обнаружения объектов, определения расстояния до цели [1–3], актуальными являются задачи определения электрофизических параметров зондируемых объектов и сред [4–7]. Чтобы получить наиболее полную информацию об исследуемом объекте, необходимо не просто принять отраженный сигнал, но и зарегистрировать зависимость его амплитуды от времени (форму) с минимальными искажениями. Это обстоятельство существенно повышает требования к характеристикам радиолокационной системы и обуславливает необходимость расширить динамический диапазон приемника (одновременно увеличив энергетический потенциал георадара) за счет уменьшения уровня шумов, приведенных ко входу приемника, используя накопление энергии принимаемых сигналов [8].

Как показано в [9], для процесса накопления сигналов существует оптимальное число накоплений, обусловленное определенной нестабильностью синхронизации приемника – джиттером (от англ. *jitter* – дрожание, флуктуации; разброс). (Здесь критерий оптимума задается по возникающему вследствие нестабильности периода следования уширению гармоник спектра частот периодического сигнала) Чем больше джиттер, тем меньше допустимое оптимальное количество накапливаемых сигналов. Поэтому, чтобы, с одной стороны, иметь возможность накапливать сигналы, уменьшая уровень шумов, а с другой – минимизировать искажения формы георадиолокационного сигнала в процессе его регистрации, очень важно правильно оценить джиттер приемника георадара.

Джиттер как явление обусловлен случайными процессами, которые происходят в цепях

синхронизации – шумовыми флуктуациями уровня срабатывания компараторов, триггеров, воздействием случайных помех на времязадающие цепи и т. д. В статье под джиттером синхронизации стробоскопического преобразователя будем понимать кратковременное отклонение положений выборки из сигнала от ее идеальной временной позиции, т. е. насколько раньше или позже происходит выборка из сигнала относительно эталонного момента времени. Этот джиттер аналогичен джиттеру дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП), но относится к преобразователям эквивалентного времени.

Для сверхширокополосной видеоимпульсной георадиолокации, где используются сигналы нано- и субнаносекундной длительности, даже небольшая в абсолютных значениях времени нестабильность может полностью исказить результат георадиолокационных измерений. Как показано на рис. 1, джиттер синхронизации приемного устройства приводит к возникновению амплитудной ошибки в преобразованном (оцифрованном) сигнале, которая представляется как дополнительный шум. Этот шум снижает чувствительность георадара, что приводит к уменьшению глубины зондирования, снижению точности определения координат подповерхностных объектов, снижению вероятности обнаружения слабых контрастных объектов. Кроме того, в связи с тем, что временная нестабильность синхронизации приемника влияет на точность регистрации и воспроизведения формы принимаемого сигнала, она существенно ухудшает эффективность цифровой обработки сигналов.

Проблематике джиттера синхронизации таких приемных устройств, как АЦП с устройствами выборки и хранения, посвящены работы [10–12].

В основном эти работы касаются вопросов измерения джиттера АЦП, работающих в режиме реального времени.

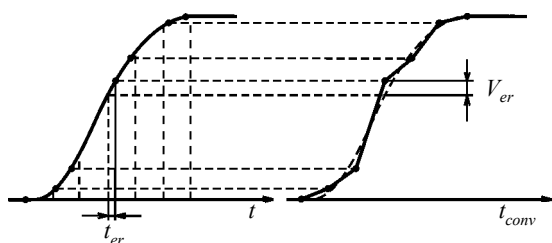


Рис. 1. Джиттер синхронизации преобразователя (t_{er} – джиттер синхронизации, V_{er} – амплитудная ошибка, t – реальное время, t_{conv} – эквивалентное время): а) сигнал на входе преобразователя; б) преобразованный сигнал

Подобная проблематика исследовалась и в георадарной технике [13, 14]. В этих работах представлены результаты исследований, посвященных разработке метода измерения джиттера для радиолокационных систем с приемными устройствами стробоскопического типа. Особенность данного метода состоит в том, что джиттер оценивается косвенно по амплитудным ошибкам преобразованного сигнала, так как в видеоимпульсных георадарах измерение джиттера приемника напрямую сопряжено с существенными сложностями.

Поскольку проявление джиттера в принятом сигнале по виду эквивалентно добавлению шума, то при анализе преобразованного сигнала эффект джиттера рассматривается как шум. В дальнейшем шумом будем называть только результаты амплитудных искажений сигнала, вносимых джиттером. Остальные источники шума в данном исследовании учитываться не будут.

Основное соотношение, которым оперируют при описании искажений, вносимых нестабильностью синхронизации, это прямопропорциональная зависимость между той частью шума, которая обусловлена джиттером, и самим джиттером [10]. Эта зависимость была выведена для преобразования с полным зарядом накопительной емкости устройства выборки и хранения АЦП, т. е. когда длительность выборки из сигнала больше постоянной времени заряда накопительной емкости.

Однако, кроме преобразователей с полным зарядом накопительной емкости, в стробоскопических преобразователях используют преобразователи с неполным зарядом. Последние имеют ряд преимуществ (высокую чувствительность, малое влияние паразитных емкостей на процесс преобразования) и поэтому перспективны с точки зрения расширения возможностей радиолокационных систем.

Из-за различия в степени заряда накопительной емкости различаются и процессы, проис-

ходящие на протяжении всего преобразования и определяющие его результат. Дело в том, что заряд, накопленный при первом стробировании, остается в устройстве выборки и хранения на протяжении нескольких периодов (накопительная емкость разряжается не полностью), создавая эффект «памяти», который имеет большое значение в процессе стробоскопического преобразования сигнала [15, 16]. Поэтому то, как изменяются искажения сигнала, вносимые джиттером, при изменении длительности выборки стробирования, также требует дополнительного исследования. Соответственно метод, в котором джиттер оценивается по амплитудным ошибкам, для преобразования с неполным зарядом накопительной емкости требует уточнений.

Целью данной работы является корректировка метода определения джиттера через амплитудные ошибки (рис. 1) для стробоскопического преобразователя (смесителя) с неполным зарядом накопительной емкости.

Метод измерения джиттера. В сверхширокополосной (СШП) импульсной радиолокации для измерения джиттера используется метод, согласно которому джиттер синхронизации рассчитывается из амплитудных ошибок преобразованного сигнала [13, 14]. Для этого массив из нескольких тысяч реализаций сигнала усредняется, и в результате определяется сигнал без шума. В полученном «идеальном» сигнале на фронте или спаде импульса – там, где наблюдается максимально быстрое изменение амплитуды сигнала, в так называемой показательной области, – выбирается показательная точка, временная координата которой обозначается t_0 . Для показательной точки по «идеальному» сигналу определяются усредненная амплитуда $\overline{V}(t_0)$ и производная сигнала $V'(t_0)$. Для каждого сигнала из исходного массива вычисляется амплитудная ошибка V_{er} , равная разности амплитуд сигнала из реализации ($V_i(t_0)$) и среднего значения в показательной точке: $V_{er} = V_i(t_0) - \overline{V}(t_0)$. Составляется массив амплитудных ошибок, и по этим данным рассчитывается джиттер синхронизации t_j как отношение амплитудной ошибки к значению производной сигнала в показательной точке:

$$t_j = V_{er} / V'(t_0). \quad (1)$$

В результате этих пересчетов получается массив джиттера (временных ошибок), по которому можно вычислить среднеквадратичное значение джиттера и построить диаграмму временных ошибок синхронизации. Однако, поскольку амплитуда сигнала на выходе преобразователя определяется тем, насколько в процессе выборки

была заряжена накопительная емкость, то метод определения величины джиттера через амплитудные ошибки в случае, когда накопительная емкость заряжается не полностью, требует уточнения.

Моделирование процесса преобразования.

Для сопоставления и выяснения степени корректности определения джиттера через амплитудные ошибки проведем математическое моделирование процесса преобразования сигнала с джиттером преобразователями с полным и неполным зарядом накопительной емкости. При моделировании используем упрощенную модель стробоскопического преобразователя, эквивалентная схема которого представлена на рис. 2 [10]. В данном исследовании существенную роль играют процессы заряда/разряда накопительной емкости C_H . Поэтому рассматриваемая модель учитывает потери заряда накопительной емкости, происходящие вследствие утечки через сопротивление буферного усилителя R_B . Остальные параметры – форма вольтамперной характеристики диода, паразитные параметры и др. – считаются одинаковыми для преобразователей обоих типов и, в данном случае, существенно не влияющими на исследуемый процесс преобразования.

На схеме (рис. 2) диодный смеситель заменен ключом S . Ключ замыкается на короткое время δ . В течение этого времени накопительная емкость C_H заряжается/разряжается под действием напряжения входного (преобразуемого) сигнала $U(t)$.

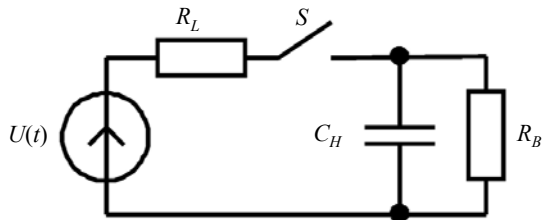


Рис. 2. Эквивалентная схема стробоскопического преобразователя

Рассматриваемая модель описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dv_n}{dt} + \frac{v_n}{\tau} = \frac{U(t)}{\tau}, \\ v_{0n} = v_{n-1} \left(T_{n-1} + \frac{\delta}{2} \right) e^{-\frac{T_R}{R_B C_H}}, \\ t_{0n} = T_n - \frac{\delta}{2} + t_{er}^n, \\ t_{1n} = T_n + \frac{\delta}{2} + t_{er}^n. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $U(t)$ – сигнал, подаваемый на вход преобразователя; $\tau = R_L \times C_H$ – постоянная времени заряда накопительной емкости; R_L – эквивалентное сопротивление стробоскопического смесителя; C_H – емкость накопительного конденса-

тора; множитель $e^{-\frac{T_R}{R_B C_H}}$ описывает разряд накопительного конденсатора во время фазы хранения заряда, длительность которой равна T_R – периоду повторения сигналов; R_B – входное сопротивление буферного усилителя; T_n – момент времени, когда производится выборка из сигнала (индекс n обозначает номер выборки); δ – длительность выборки.

Для каждого T_n дифференциальное уравнение (2) решалось методом Рунге–Кутты с начальным условием v_{0n} на интервале (t_{0n}, t_{1n}) , и таким образом определялась $v_n(t_{1n})$ – конечная величина напряжения, сохраненного на C_H . В граничные условия уравнения (2) введена случайная для каждой n -й выборки величина t_{er}^n – временная ошибка синхронизации или джиттер. Как правило, джиттер имеет нормальный закон распределения, поэтому будем считать, что функция плотности вероятности параметра t_{er} тоже удовлетворяет этому закону, а уровень джиттера σ_r определим как среднеквадратичное отклонение t_{er} .

Численный анализ. В качестве входного сигнала взят единичный перепад напряжения со временем нарастания фронта $\Theta = 1$ нс (рис. 3). В дальнейших расчетах временные параметры будем нормировать на время нарастания фронта сигнала Θ , а величины напряжения – на амплитуду сигнала. В обозначениях на рисунках также будем использовать нормированные величины.

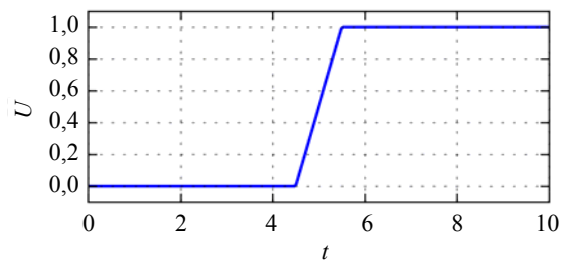


Рис. 3. Сигнал на входе преобразователя

В работе моделировалось преобразование единичного перепада с длительностями выборки δ , принимающими дискретные значения в диапазоне от $0,1 \Theta$ до $0,5 \Theta$, и добавлением джиттера, уровень которого (σ_r) выбирался в пределах от $0,01 \Theta$ до $1,0 \Theta$.

На рис. 4 показан набор преобразованных сигналов (подобие ай-диаграмм [17]) при $\sigma_r = 0,08 \Theta$.

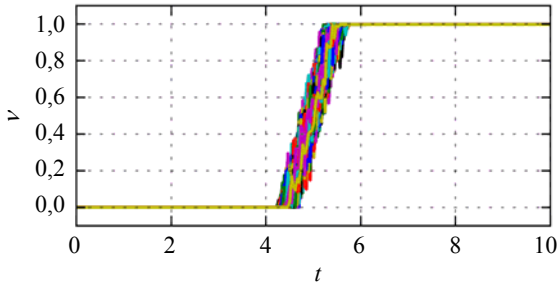


Рис. 4. Набор преобразованных сигналов

Расчет проводился для 1 000 преобразований с одинаковыми длительностями выборки и уровнями джиттера σ_r .

На рис. 5 показано, как изменяется среднеквадратичное отклонение амплитудных ошибок преобразованного сигнала $\sigma_{V_{er}}$ в случае полного (рис. 5, а) и неполного (рис. 5, б) заряда накопительной емкости при разных уровнях джиттера. Пример соответствует длительности выборки, равной $0,1 \Theta$.

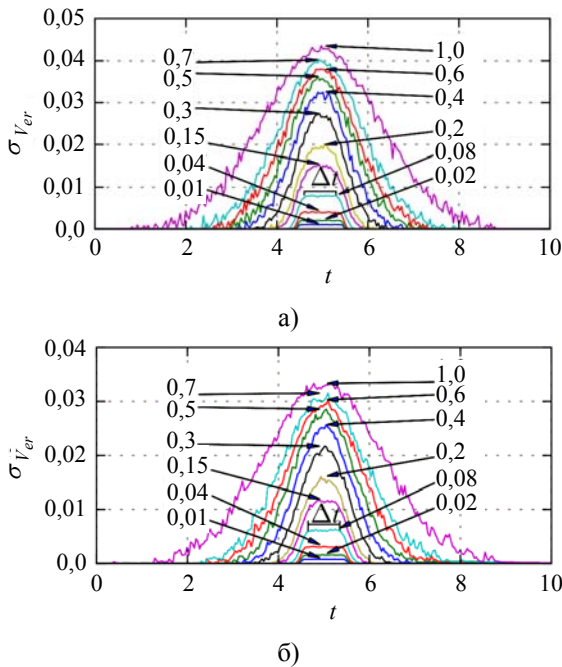


Рис. 5. Среднеквадратичное отклонения амплитудной ошибки при уровнях джиттера σ_r от $0,01 \Theta$ до $1,0 \Theta$ для преобразований с полным (а) и неполным (б) зарядом емкости

Видно, что область Δt (рис. 5) на фронте сигнала, в которой среднеквадратичное отклонение $\sigma_{V_{er}}$ не изменяется, сужается с ростом уровня джиттера. Именно в этой области выбираются

показательные точки, и для этой области характерно нормальное распределение амплитудных ошибок V_{er} , подобное распределению джиттера (параметра t_{er}). Это иллюстрируют гистограммы распределения амплитудных ошибок (рис. 6). Так, при уровне джиттера порядка $0,15 \Theta$ распределение амплитудных ошибок для точек в показательной области еще носит нормальный характер, в то время как при джиттере $\sigma_r = 0,3 \Theta$ даже для точки в середине фронта сигнала форма распределения амплитудных ошибок отличается от нормального распределения, что свидетельствует о размытии показательной области.

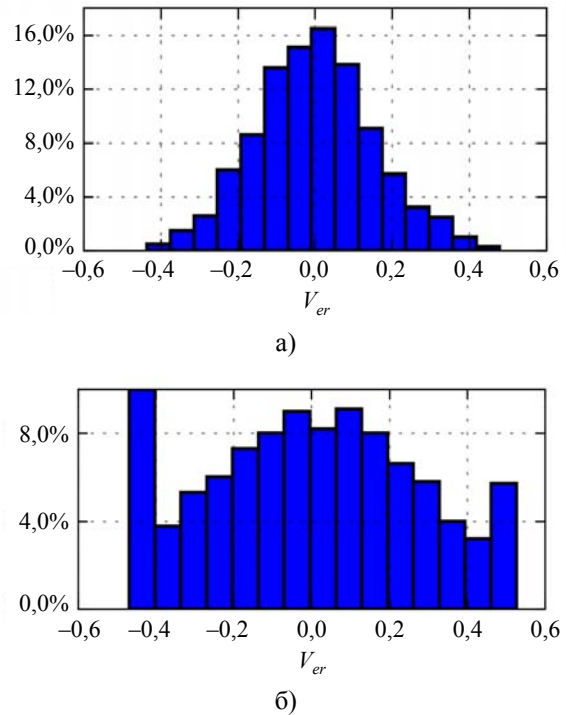


Рис. 6. Гистограммы распределения амплитудной ошибки: а) $\sigma_r = 0,15 \Theta$; б) $\sigma_r = 0,3 \Theta$

Важно отметить, что для ряда величин σ_r показательная область вообще отсутствует – форма распределения амплитудных ошибок для всех точек фронта сигнала отличается от распределения джиттера. Соответственно, при этих уровнях джиттера рассматриваемый метод дает некорректную оценку статистических величин. Это свойство необходимо учитывать при дальнейших расчетах и ограничиваться тем набором параметров σ_r , при которых еще существует временной промежуток, где форма распределения амплитудных ошибок такая же, как и у распределения джиттера.

На рис. 7 показано, как изменяется ширина показательной области при увеличении джиттера. Длительность выборки $0,1 \Theta$.

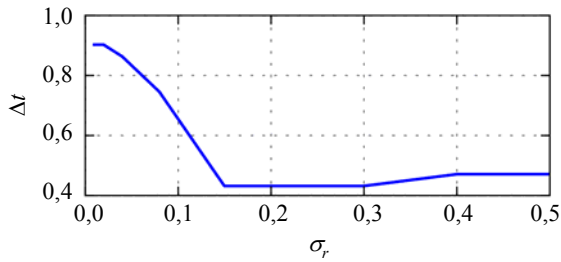


Рис. 7. График зависимости ширины показательной области для полного заряда емкости

Из графика видно, что с увеличением джиттера показательная область сужается от $0,9 \Theta$ до $0,4 \Theta$ и при уровне джиттера $\sigma_r = 0,15 \Theta$ достигает минимума. При уровне джиттера порядка $0,15 \Theta$ статистическое распределение временных ошибок лежит в области $\pm 0,45 \Theta$ («правило трех сигм») [18]. При $\sigma_r > 0,15 \Theta$ область распределения вероятности джиттера (во всех точках фронта сигнала) захватывает области сигнала с резким изменением производной. Поэтому с ростом уровня джиттера влияние этих участков на статистические величины, такие как среднеквадратичное отклонение и среднее значение, возрастает. Следовательно, метод оценки джиттера через амплитудные ошибки можно применять для случаев, когда $\sigma_r < \Theta/6$.

Для проверки метода показательная точка выбиралась в середине фронта сигнала. На рис. 8 проведено сопоставление пересчитанных по методу уровней джиттера σ_j (среднеквадратичного отклонения джиттера t_j , вычисленного по формуле (1)) и уровней джиттера, заданных при моделировании для наборов длительностей выборок от $0,1 \Theta$ до $0,5 \Theta$.

Как видно из графика (рис. 8, а), соответствующего случаю полного заряда накопительной емкости, расчет джиттера через амплитудные ошибки дает адекватную оценку только при уровнях джиттера меньше $0,15 \Theta$. С увеличением уровня джиттера погрешность оценки возрастает. Этот результат подтверждает правильность критерия $\sigma_r < \Theta/6$.

Необходимо подчеркнуть, что при неполном заряде накопительной емкости метод оценки джиттера дает неверные результаты (рис. 8, б). Величины пересчитанного джиттера занижены для всех длительностей выборки и приближаются к истинным значениям джиттера лишь при самой большой длительности выборки. Причина такого поведения – аналоговое усреднение амплитудных ошибок. Это происходит из-за того, что преобразователь в режиме неполного заряда накопительной емкости проявляет свойства сумматора-накопителя, т. е. после процесса выборки величина напряжения на накопительном

конденсаторе устройства выборки и хранения зависит от напряжения до начала этой выборки. Таким образом, накопительный конденсатор «сглаживает» скачки амплитуды сигнала, вызванные нестабильностью синхронизации.

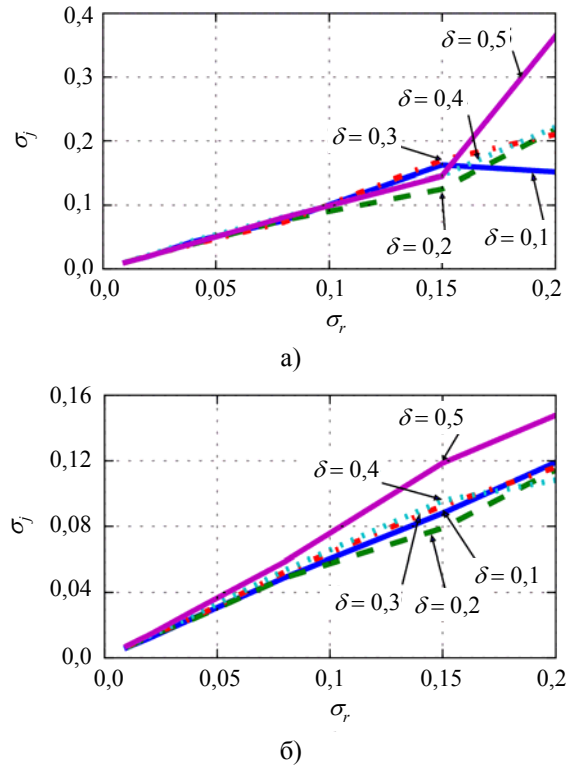


Рис. 8. Графики зависимости рассчитанного уровня джиттера σ_j от заданного σ_r для полного (а) и неполного (б) заряда емкости ($\delta = 0,1 \Theta \dots 0,5 \Theta$)

Корректировка метода оценки джиттера для случая неполного заряда. Упрощенно процесс преобразования сигнала в случае неполного заряда накопительной емкости можно описать следующим выражением [15]:

$$V_n = gV_{n-1} + k(U_n - gV_{n-1}), \quad (3)$$

где V_n – напряжение на накопительной емкости после n -го стробирования; V_{n-1} – напряжение на емкости после $(n-1)$ -го стробирования; g – коэффициент потерь преобразователя (в упрощенном варианте его можно заменить множителем, который описывает токи утечки в (2): $g = e^{-\frac{T_R}{R_B C_H}}$); k – коэффициент передачи преобразователя/смесителя; U_n – напряжение сигнала в момент n -го стробирования.

Используя выражение (3), находим U_n :

$$U_n = \frac{V_n + (k-1)gV_{n-1}}{k}. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что значение амплитуды сигнала, действующей на входе преобразователя в момент n -го стробирования, мож-

но восстановить, зная преобразованное напряжение от n -го стробирования и преобразованное напряжение перед n -м стробированием. Процедура (4) позволяет численно скорректировать результат преобразования с неполным зарядом накопительной емкости, сделав его таким же, как в случае полного заряда накопительной емкости, и тем самым обеспечить возможность правильной оценки джиттера по методу, используемому для преобразования с полным зарядом.

На рис. 9 показаны графики зависимости рассчитанных уровней джиттера от заданных при моделировании значений с учетом восстановления амплитуды сигнала в показательной точке с использованием выражения (3).

Видно, что после процедуры восстановления амплитуды сигнала с применением (3) метод оценки джиттера дает адекватное соотношение между расчетным значением и заданным. Как в случае оценки джиттера при преобразовании с полным зарядом, так и в данном случае погрешность метода растет с увеличением уровня джиттера, что обусловлено сужением показательной области.

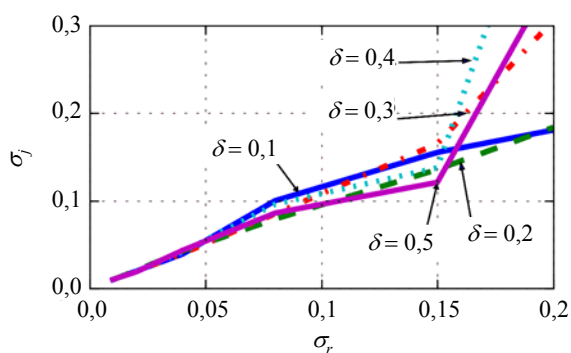


Рис. 9. Пересчитанный джиттер при длительностях выборки от $0,1\Theta$ до $0,5\Theta$

Выводы. Таким образом, анализ стробоскопического преобразования с учетом джиттера показывает, что метод оценки джиттера по амплитудным ошибкам верен для преобразования с полным зарядом накопительной емкости только в случае малых по сравнению с длительностью фронта сигнала джиттеров. С увеличением джиттера, когда его среднеквадратичное значение становится больше шестой части фронта, получают некорректные результаты пересчета амплитудных ошибок.

Прямое применение метода оценки джиттера по амплитудным ошибкам для случая преобразования с неполным зарядом накопительной емкости дает некорректные результаты. Это объясняется тем, что преобразователь в режиме неполного заряда «подавляет» амплитудные ошибки, вызванные джиттером. Поэтому для преобразования с неполным зарядом накопительной емкости

рассмотренный метод можно применять только после восстановления амплитуды сигнала, например, как предложено выше – вычисляя по двум соседним точкам с учетом коэффициента передачи и коэффициента потерь смесителя стробоскопического преобразователя. Эти коэффициенты не зависят от джиттера и определяются по результатам должных измерений.

Предложенная процедура восстановления амплитуды сигнала позволяет привести преобразование с неполным зарядом накопительной емкости к преобразованию с полным зарядом, сделав их эквивалентными, и использовать для оценки джиттера проверенный метод. Уточненный таким способом метод оценки джиттера дает корректные результаты для преобразования с неполным зарядом накопительной емкости.

Работа выполнена в рамках проекта «Радиолокационный мониторинг технического состояния подповерхностной части инженерных сооружений» комплексной программы научных исследований НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» («РЕСУРС»).

Автор работы благодарит Г. П. Почанина за многочисленные полезные обсуждения, которые помогли повысить качество публикации.

Библиографический список

1. Астанин Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. – М.: Радио и связь, 1989. – 190 с.
2. Владов М. Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
3. *On the Range Precision of UWB Radar Sensors* / J. Sachs, M. Helbig, R. Herrmann et al. // Proc. 11th Int. Radar Symp. (IRS). – Vilnius, 2010. – P. 1–4
4. *Measuring of thickness of asphalt pavement with use of GPR* / G. P. Pochanin, A. G. Batrakova, S. N. Urdzik et al. // Proc. 15th Int. Radar Symp. (IRS). – Gdansk, 2014. – P. 452–455.
5. Patent 5835053 USA, US 08/082,115. Roadway ground penetrating radar system / J. L. Davis; filing date 28.06.1993; issue date 10.11.1998.
6. *3D Ground Penetrating Radar to Detect Tree Roots and Estimate Root Biomass in the Field* / Shiping Zhu, Chunlin Huang, Yi Su and Motoyuki Sato // Remote Sens, the Spec. Iss. Close-Range Remote Sensing by Ground Penetrating Radar. – 2014. – P. 5754–5773.
7. *De Chiara F. GPR Laboratory Tests For Railways Materials Dielectric Properties Assessment* / F. De Chiara, S. Fontul, E. Fortunato // Remote Sens, the Spec. Iss. Close-Range Remote Sensing by Ground Penetrating Radar. – 2014. – P. 9712–9728.
8. *Enlarging of power budget of ultrawideband radar* / G. P. Pochanin, V. P. Ruban, P. V. Kholod et al. // Proc. 6th Int. Conf. “Recent Advances in Space Technologies” (RAST2013). – Istanbul, 2013. – P. 213–216.
9. *Orlenko A. A. Optimum synthesis of transmitting-receiving sections of an underground radar* / A. A. Orlenko, P. V. Kholod // 3rd Int. Kharkov Symp. “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’98): proc. – Kharkov, 1998. – Vol. 2. – P. 546–548.
10. *Brannon B. Sampled Systems and the Effects of Clock Phase Noise and Jitter* / B. Brannon // Applications Note AN – 756,

- Analog Devices, Inc. Available [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.analog.com](http://www.analog.com). – Загл. с экрана.
11. *Brannon B.* Aperture Uncertainty and ADC System Performance / В. Brannon, А. Barlow // Applications Note AN – 501, Analog Devices, Inc. Available [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.analog.com](http://www.analog.com). – Загл. с экрана.
 12. *Enge J.* The Power Spectral Density of Phase Noise and Jitter: Theory, Data Analysis, and Experimental Results / J. Enge // Applications Note AN – 1067, Analog Devices, Inc. Available [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.analog.com](http://www.analog.com). – Загл. с экрана.
 13. *Дудник А. В.* Особенности измерения временной нестабильности в приемниках георадаров / А. В. Дудник // Наукоемкие технологии. – 2008. – 9, № 8. – С. 12–20.
 14. *Дудник А. В.* Методы измерения и анализа джиттера в приемниках георадаров / А. В. Дудник // Успехи современной радиоэлектрон. – 2009. – № 1/2. – С. 51–57.
 15. *Грязнов М. И.* Измерение параметров импульсов / М. И. Грязнов, М. Л. Гуревич, Ю. Я. Рябинин. – М.: Радиосвязь, 1991. – 215 с.
 16. *Стробоскопическое* преобразование сигналов при аналоговом накоплении / В. П. Рубан, А. А. Шуба, А. Г. Почанин, Г. П. Почанин // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 4. – С. 83–89.
 17. *Anatomy of an Eye Diagram.* Applications Note, Tektronix. Available [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.tek.com](http://www.tek.com). – Загл. с экрана.
 18. *Пискунов Н. С.* Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов: в 2 т. Т. 2 / Н. С. Пискунов. – 13-е изд. – М.: Наука, 1985. – 560 с.

Рукопись поступила 15.01.2016.

V. P. Ruban

JITTER OF SYNCHRONIZATION OF THE STROBOSCOPIC CONVERTER

The estimation of synchronization instability becomes actual in GPR due to the fact that this phenomenon affects the accuracy of recording and reproducing the received signal forms and, accordingly, the efficiency of use of digital signal processing algorithms. The existing method for estimation of jitter of the GPR receiver using errors of the converted signal amplitude is not universal and should be corrected for the case of converter with incomplete charging of the storage capacitor. Simulation of the stroboscopic conversion with instability of sampling interval for cases of full charging (when the evaluation method gives correct results) and incomplete charging of the storage capacitor has been

done in this paper. The relationship between the forms of probabilistic distribution of jitter and errors of amplitude after stroboscopic conversion has been analyzed. The jitter values originally specified in the simulation and the ones calculated (reconstructed) by a known method also have been analyzed. According to the simulation results, the limits of applicability of this method were determined. It is shown that the direct application of the jitter evaluation method which is right for the converter with a full charging gives incorrect estimates for the one with incomplete charging of storage capacitor. Due to this, the signal amplitude recovery procedure which allows obtaining a correct estimate of the jitter of synchronization of GPR receivers operating in the mode of incomplete charge storage capacitor has been suggested.

Keywords: jitter, stroboscopic conversion, sampling, ground penetrating radar, accuracy of signal waveform measurement.

В. П. Рубан

ДЖИТЕР СИНХРОНІЗАЦІЇ СТРОБОСКОПІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У підверхневій радіолокації стає актуальною оцінка часової нестабільності – джитера приймача у зв'язку з тим, що це явище впливає на точність реєстрації та відтворення форми прийнятого сигналу та, відповідно, на ефективність застосування алгоритмів цифрової обробки сигналів. Існуючий метод оцінки джитера приймача георадара за амплітудними помилками перетвореного сигналу не універсальний та потребує уточнень для перетворювачів з неповним зарядом накопичувального конденсатора. У цій роботі виконано моделювання стробоскопічного перетворення з часовою нестабільністю вибірки для випадків повного заряду, коли метод оцінки дає коректні результати, та неповного заряду накопичувального конденсатора; проаналізовані співвідношення форми ймовірнісного розподілення джитера та амплітудних помилок стробоскопічного перетворення, а також рівнів джитера, заданих спочатку при моделюванні та розрахованих (відтворених) відомим методом. За результатами моделювання визначені межі застосування даного методу. Показано, що пряме застосування методу оцінки джитера, вірне для перетворення з повним зарядом, дає неправильні оцінки для стробоскопічного перетворення з неповним зарядом накопичувального конденсатора. У зв'язку з цим запропоновано процедуру відновлення амплітуди сигналу, яка дозволяє отримати коректну оцінку джитера синхронізації приймачів георадарів, що працюють в режимі неповного заряду накопичувального конденсатора.

Ключові слова: джиттер, стробоскопічне перетворення, вибірка, георадар.