

УДК 621.376.4

## ОЦЕНКА ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ТРАКТЕ АЦП ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

С.Ю. Бурцев, Д.С. Печерица

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
burtsevsy@vniiftri.ru,  
pecheritsa\_ds@vniiftri.ru

*Аннотация.* Измерительный тракт радионавигационной аппаратуры имеет зависимость времени прохождения сигнала от частоты его несущей. Для обеспечения единства измерений радионавигационной аппаратуры ведётся разработка эталонного испытательного оборудования. При проведении работ по калибровке имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем особое внимание уделяется зависимости группового времени запаздывания сигнала в тракте эталонного оборудования от несущей частоты сигнала. В статье рассматривается метод оценки задержки сигнала в тракте с аналого-цифровым преобразователем эталонного испытательного оборудования координатно-временных средств измерений с прослеживаемостью к эталону импульсного электрического напряжения.

*Ключевые слова:* калибровка, имитатор навигационных сигналов, навигационный приёмник, аналого-цифровой преобразователь.

## SIGNAL DELAY ESTIMATION OF THE MEASURING DEVICE ADC PATH

S.Y. Burtsev, D.S. Pecheritsa

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
burtsevsy@vniiftri.ru,  
pecheritsa\_ds@vniiftri.ru

*Abstract.* The measuring path of radio navigation equipment has a dependence of the signal transit time on the frequency of its carrier. To ensure the uniformity of radio navigation equipment measurements, reference test equipment is being developed. When carrying out work of the calibration of global navigation satellite systems signal simulators, special attention is paid to the dependence of the signal group delay time in the reference equipment path on the signal carrier frequency. The article discusses a method for estimating the signal group delay time in the path with an analog-to-digital converter of the reference test equipment of coordinate-time measuring instruments with traceability to the pulsed electrical voltage standard.

*Keywords:* calibration, simulator of global navigation systems signals, receiver, analog-to-digital converter.

### Введение

Прослеживаемость единиц величин метрологических характеристик средств измерений к первичному эталону единиц величин, по государственной поверочной схеме (ГПС), обеспечивает единство в области измерений.

Согласно действующей ГПС [1], для имитаторов навигационных сигналов ГНСС определены следующие основные метрологические характеристики:

- погрешность формирования беззапросной дальности по фазе дальномерного кода;
- погрешность формирования беззапросной дальности по фазе несущей частоты;
- погрешности формирования скорости изменения беззапросной дальности;
- погрешности синхронизации шкалы времени имитатора (выход сигнала метки времени) с меткой времени, передаваемой в навигационном сигнале.

В настоящее время популярна методика определения метрологических характеристик имитаторов сигналов ГНСС с помощью осциллографа [2–4], которая имеет следующие недостатки и ограничения:

- генерируемый имитатором навигационный сигнал должен быть только от одного неподвижного навигационного космического аппарата (НКА) в одном частотном диапазоне, без существенных изменений амплитуды за исключением переходных процессов во время модуляции, вызванных ограничением спектра формируемого навигационного сигнала;
- имитатор должен иметь строгую привязку воспроизведения несущей частоты к внутренней шкале времени;
- чувствительность к температуре окружающей среды при длительной серии измерений (поддержание температуры в пределах одного градуса по Цельсию не оказывает существенного влияния на результаты измерений);
- длительное время определения метрологических характеристик имитатора навигационных сигналов.

Современные методы калибровки имитатора ГНСС, включающие в себя те же принципы обработки навигационного сигнала, что и навигационный приёмник, привели к разработке нового класса устройств (калибраторов), требующих прослеживаемости к первичным эталонам.

При калибровке имитатора сигналов ГНСС осциллографическим методом использование импульсного сигнала метки времени (1 Гц), имеющего конечную величину длительности фронта с джиттером, заметно увеличивает погрешность измерения задержки. Для уменьшения погрешности измерения задержки шкалы точного отсчёта используется фаза сигнала опорной частоты (10 МГц), а фронт сигнала метки времени используется как «грубая» подстройка, обеспечивающая устранение фазовой неоднозначности сигнала опорной частоты.

В калибраторе имитатора сигналов сигналы опорной частоты и импульсной метки времени поступают в формирователь комплексной метки времени (ФКМВ), где формируются в сигнал комплексной метки времени (КМВ), который обладает следующими преимуществами:

- структура сигнала схожа с навигационным сигналом в том же частотном диапазоне;
- узкополосный спектр сигнала в области 10 МГц;

- сохраняется возможность измерений метки времени по фазе несущей частоты с высокой точностью;
- появляется возможность накладывать цифровую информацию, например телеметрию.

ФКМВ позволяет переходить от сигналов импульсной метки времени и опорной частоты к сигналу КМВ и обратно.

Навигационный сигнал суммируется с КМВ в сумматоре и подаётся на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), где полученный цифровой сигнал на выходе передаётся в блок цифровой обработки с целью получения результатов измерения погрешности формирования псевдодальности имитатора сигналов ГНСС.

Такое конструктивное решение позволяет привязать отсчёты АЦП по времени и по уровню, что потенциально даёт новые возможности в части измерения временных и энергетических параметров навигационных сигналов.

### **Постановка задачи**

При разработке калибратора важную роль играет определение задержек в трактах передачи навигационного сигнала и метки времени.

Решение этой задачи главным образом зависит от определения задержки сигнала при его преобразовании в цифровую последовательность в АЦП (до выхода сигнала из АЦП) и заключается в оценке фазочастотной характеристики АЦП, которая определяет групповое время запаздывания (ГВЗ) тракта преобразования для разных частот [5, 6].

### **Теория**

Производная фазовой характеристики по частоте соответствует ГВЗ сигнала:

$$\tau = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}. \quad (1)$$

Линейная фазочастотная характеристика (ФЧХ) соответствует одинаковой временной задержке всех частотных составляющих полезного сигнала. Следовательно, линейной фазовой характеристике соответствует постоянное ГВЗ сигнала. Причём чем больше крутизна фазовой характеристики, тем больше время запаздывания.

ФЧХ  $\varphi(\omega)$  может быть получена из передаточной функции при переходе к комплексно-частотной характеристике (КЧХ) [7]:

$$W(s) \xrightarrow{s=i\omega} W(i\omega) = A(\omega) \cdot e^{-i \cdot \varphi(\omega)}. \quad (2)$$

Передаточная функция определяется как отношение преобразованной по Лапласу выходной характеристики  $Y(s)$  объекта к входному единичному ступенчатому воздействию  $X(s) = 1/s$  или, другими словами, преобразованная по Лапласу переходная характеристика объекта.

В качестве ступенчатого воздействия может выступать импульс, длительность которого существенно больше времени нарастания его фронта, а время нарастания меньше периода дискретизации.

### Результаты экспериментов

Апробация метода была проведена на измерительном канале осциллографа с быстродействующим 8-битным АЦП с частотой преобразования 40 Гвыб/с. Сигнал в виде короткого импульса длительностью 100 нс и временем нарастания фронта 10 пс подавался от эталона импульсного напряжения в виде генератора импульсных сигналов.

Оценка ФЧХ проводилась следующим образом:

- на измерительный канал осциллографа подавался короткий импульс от генератора импульсных сигналов;
- проводилось измерение импульса осциллографом с частотой 40 Гвыб/с, интерполяцией  $\sin(x)/x$  и многократным усреднением на интервале времени 100 нс;
- оцифрованный сигнал сохранялся на внешнем запоминающем устройстве для дальнейшей цифровой обработки;
- в прикладном математическом программном обеспечении рассчитывалось быстрое преобразование Фурье и проводилась оценка ФЧХ измеренного сигнала.

Результаты оцифровки переднего фронта импульсного сигнала представлены на рис. 1. Колебания после нарастания фронта импульса вызваны ограничением полосы пропускания канала осциллографа.

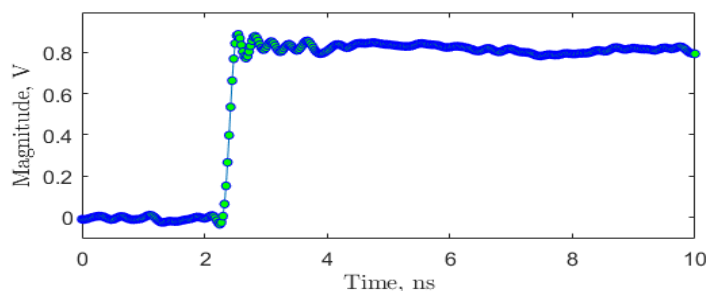


Рис. 1. Оцифрованный передний фронт импульсного сигнала

ФЧХ, полученная в результате быстрого преобразования Фурье, измеренного импульса представлена на рис. 2.

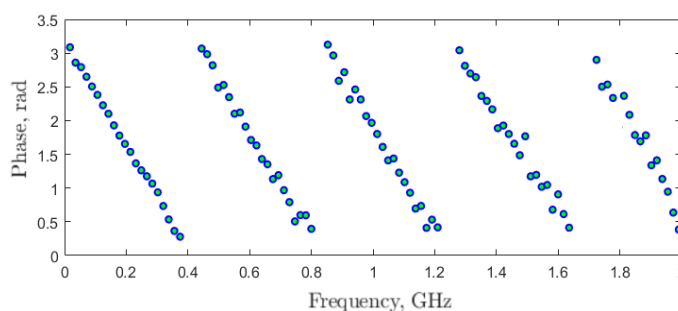


Рис. 2. ФЧХ измеренного импульсного сигнала

Из рис. 2 видно, что ФЧХ канала осциллографа имеет линейную зависимость, что гарантирует в случае применения АЦП со схожими характеристиками в калибраторе постоянство ГВЗ при суммировании сигнала КМВ с радиочастотным сигналом.

### Обсуждение результатов

Линейность ФЧХ АЦП можно доказать аналитическим путем, представив полученную кривую разгона в виде модели колебательного звена:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент усиления модели;  $T$  — постоянная времени модели;  $\xi$  — коэффициент затухания модели.

Для получения аналитических результатов была составлена структурная схема модели в специализированном математическом программном обеспечении.

В результате решения задачи оптимизации поиска минимального квадратического отклонения модели от экспериментальных данных были получены значения параметров модели, представленные в таблице.

Таблица

Параметры модели аппроксимации

Параметр модели	Значение	Параметр модели	Значение
$k_1$	$3,04 \cdot 10^{15}$	$k = 1 / k_3$	0,8283
$k_2$	$2,38 \cdot 10^{-8}$	$T = 1 / \sqrt{k_1 k_3}$	$0,15 \cdot 10^{-9}$
$k_3$	1,2073	$\xi = k_2 \sqrt{k_1 k_3} / 2$	0,65

КЧХ модели имеет вид, представленный на рис. 3.

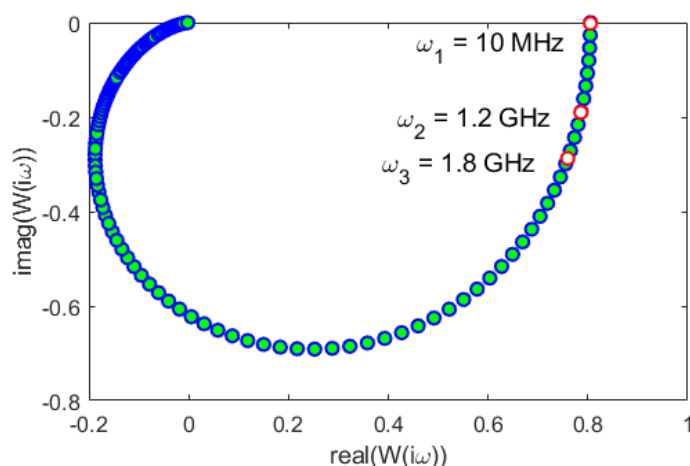


Рис. 3. КЧХ модели канала осциллографа

ФЧХ модели канала осциллографа имеет вид:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{2\xi T \omega}{1 - T^2 \omega^2} + \pi n, \quad (4)$$

при  $n = 0, \omega \leq 1/T$ ;  $n = -1, \omega > 1/T$ .

Из рис. 3 видно, что исследуемая область частот лежит в четвёртом квадранте. Выразим производную ФЧХ модели канала осциллографа:

$$\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \frac{2\xi T(1 - T^2 \omega^2)}{4\xi^2 T^2 \omega^2 + (1 - T^2 \omega^2)^2}. \quad (5)$$

График ФЧХ модели канала осциллографа в диапазоне от 0 до 2 ГГц представлен на рис. 4:

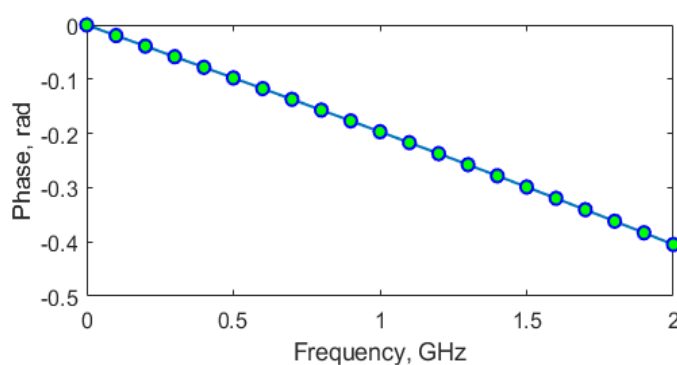


Рис. 4. ФЧХ модели канала осциллографа

При малых значениях постоянной времени  $T$  и распределения частот системы в четвёртом квадранте в области низких частот производная ФЧХ будет принимать линейную зависимость, что обеспечивает постоянное значение ГВЗ.

Оценим значение ГВЗ, устремив частоту производную по частоте модели канала осциллографа к нулю:

$$\tau = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left( \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \right) = 2\xi T. \quad (6)$$

### Список литературы

1. Приказ Росстандарта № 2831 от 29 декабря 2018 г. «Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных средств измерений».
2. Burtsev S.Y., Pecheritsa D.S., Frolov A.A. Method of estimating the carrier phase generation error by GNSS simulators // Proc. Of the 13<sup>th</sup> Annual Baška GNSS Conference. — 2019. — P. 21–28.
3. Burtsev S.Y., Pecheritsa D.S., Fedotov V.N. Software of estimating the pseudo-range generation error by GNSS simulators: Certificate of program registration RU2021619933. — 2021.
4. Pecheritsa D.S., Burtsev S.Yu., Frolov A.A. Method for Determining the Fractional Part of the Cycle of the Carrier Frequency of the Navigation Signal of the GNSS Signal Simulator // Measurement Techniques. — 2021. — P. 1–8.
5. Ganesh E.N. Design of digital frequency sensitive phase detector and study its phase response // International journal of microwave and wireless technologies. — 2022. — 8(3). — P. 40–49.
6. Naylor J.R. Testing digital/analog and analog/digital converters // IEEE transactions on Circuits and Systems. — 1978. — 25 (7). — P. 526–538.
7. Medawar S., Händel P. On the calibration of wideband analog–digital converters // IEEE transactions on instrumentation and measurement. — 2013. — 62 (8). — P. 2353–2355.

*Статья поступила в редакцию: 03.11.2022 г.*

*Статья прошла рецензирование: 01.11.2022 г.*

*Статья принята в работу: 07.11.2022 г.*