

Моделирование входных широкополосных трактов устройств с квадратурной обработкой информации

Анатолий ДЯТЛОВ,
д. т. н., профессор
Дмитрий ТРОЦ

При проведении радиомониторинга (РМ) в широком частотном диапазоне все чаще применяются приемники с прямым преобразованием частоты (ПППЧ) [1] и автокорреляционные частотные дискриминаторы [2]. В них используются входные тракты, в которых реализуется квадратурная обработка.

Структуры широкополосных квадратурных трактов (ШКТ) ПППЧ и АЧД приведены на рис. 1, где ГС — генератор сигналов; ЛТП₁ и ЛТП₂ — линейные тракты приемника; См₁ и См₂ — смесители; ФНЧ₁ и ФНЧ₂ — фильтры нижних частот; П₁ и П₂ — перемножители; Фв — фазовращатель на 90°; ЛЗ — линия задержки; U_s(T) и U_c(T) — синусные и косинусные составляющие выходных эффектов; Г — гетеродин; Ф — функциональный преобразователь arctan.

Эффективность ШКТ определяется неидентичностью коэффициентов передачи ка-

налов (K₁ ≠ K₂) и наличием фазового рассогласования:

$$\delta\varphi(f) = \Delta\varphi(f) - \pi/2,$$

где Δφ(f) — разностная фазочастотная характеристика каналов ШКТ с Фв.

В зависимости от степени несоответствия коэффициентов передачи $p = K_1/K_2$ и величины фазового рассогласования δφ(f) квадратурная обработка сопровождается появлением паразитной (зеркальной по спектру) составляющей с относительным уровнем по амплитуде:

$$K_r = \sqrt{\frac{1+p^2-2p\cos[\delta\varphi(f)]}{1+p^2+2p\cos[\delta\varphi(f)]}},$$

где K_r — коэффициент искажений, который определяет точностные характеристики устройств с квадратурной обработкой.

Авторы статьи исследуют модели контроля идентичности каналов входных широкополосных квадратурных трактов ПППЧ и АЧД при использовании программы системотехнического моделирования System View компании Elanix [3].

Исследуемые модели должны обеспечивать контроль ШКТ, к которым предъявляются следующие технические требования:

- Средняя частота частотного диапазона ШКТ — f₀ = 55 МГц.
- Ширина рабочего частотного диапазона ШКТ — Δf_П = 10 МГц.
- Длительность одного шага контроля — T_s = 2 × 10⁻³ с.
- Длительность сеанса контроля — T_κ = [2 × 10⁻³; 22 × 10⁻³] с.

При моделировании ШКТ₁ ПППЧ, структура которого приведена на рис. 1а, применяется пошаговый контроль с помощью гармонического сигнала, алгоритм которого описывается следующими соотношениями:

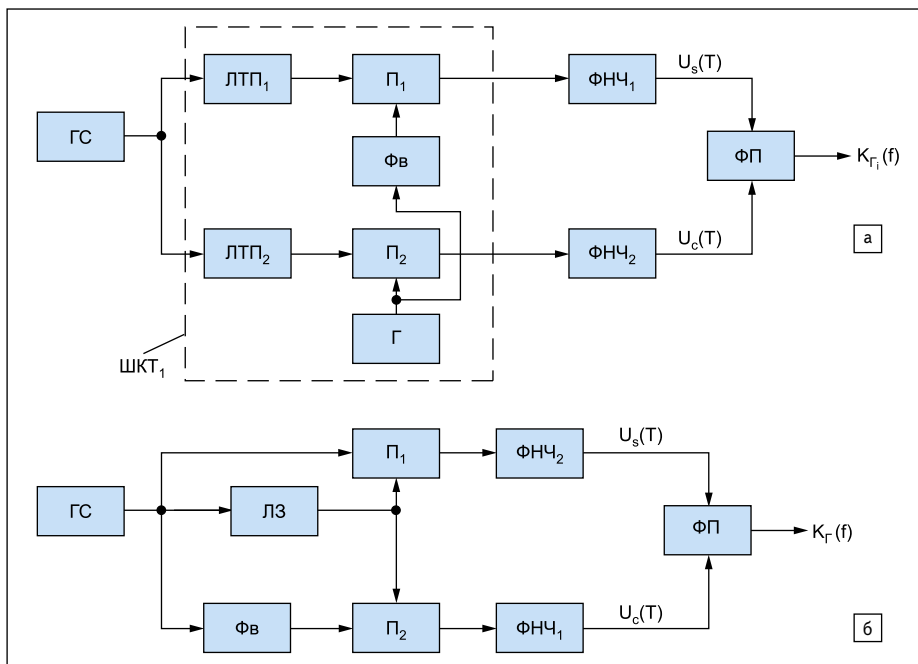


Рис. 1. Структуры широкополосных квадратурных трактов: а) в приемниках с прямым преобразованием частоты; б) в автокорреляционных частотных дискриминаторах

$$U_{s_i}(T) = \frac{K_1 K_{cm}}{T} \int_0^T U_i(t - \tau_1) U_{r_i}(t) dt;$$

$$U_{c_i}(T) = \frac{K_2 K_{cm}}{T} \int_0^T U_i(t - \tau_2) U_{r_i}(t) dt;$$

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2;$$

$$U_i(t) = U_m \cos[2\pi f_n t + (i-1)2\pi \Delta f t];$$

$$f_{s_i} = f_n + (i-1)\Delta f;$$

$$f_s \in [f_n, f_\theta];$$

$$i \in [1, N];$$

$$N = (f_n - f_\theta) / \Delta f;$$

$$f_{cp} = 1 / (2\pi T);$$

$$U_{r_i}(t) = U_m \cos[2\pi f_n t + (i-1)2\pi \Delta f t];$$

$$t_0 + (i-1)T_s \leq t \leq t_0 + iT_s;$$

$$U_{r_{1i}}(t) = U_m \sin[2\pi f_n t + (i-1)2\pi \Delta f t];$$

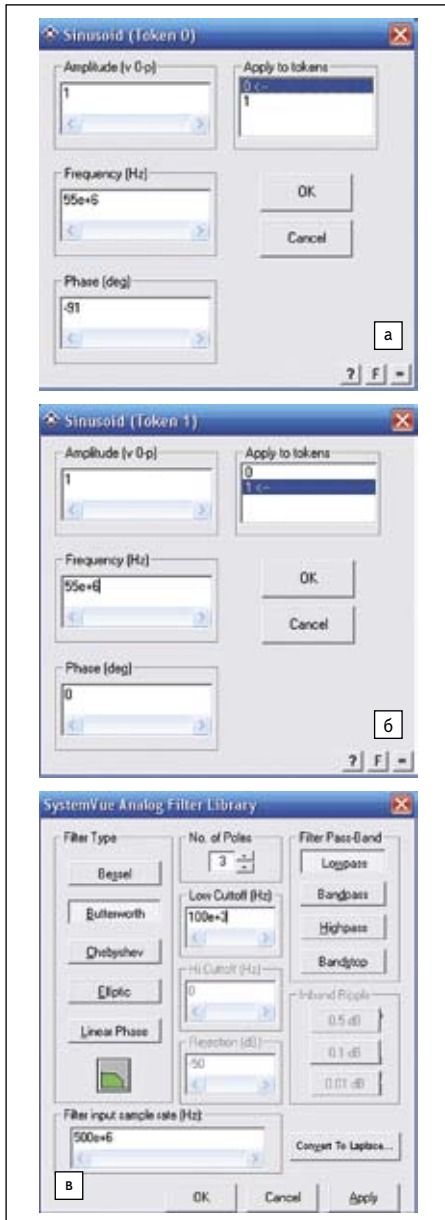


Рис. 2. Меню параметров:
а) генератора гармонических сигналов;
б) гетеродина;
в) фильтра нижних частот при пошаговом контроле

$$K_{\Gamma_i} = 20 \lg \left[\frac{U_{s_i}(T)}{U_{c_i}(T)} \right];$$

где K_1, K_2 — коэффициент передачи ЛТП₁, ЛТП₂; τ_1, τ_2 — групповое время запаздывания ЛТП₁, ЛТП₂; $\Delta\tau$ — неидентичность ЛТП₁ и ЛТП₂ по групповому запаздыванию; $U_s(t)$ — напряжение, формируемое ГС на i -м шаге контроля; $U_{\Gamma_i}(t), U_{L_i}(t)$ — i -е косинусная и синусная составляющие гетеродина напряжения; K_{cm} — коэффициент передачи П₁, П₂ размерностью 1/В; $U_{s_i}(T), U_{c_i}(T)$ — i -е синусная и косинусная составляющие выходного эффекта; U_m — амплитуда напряжения; f_{np}, f_{δ} — нижняя и верхняя границы частотного диапазона ШКТ; Δf — величина частот-

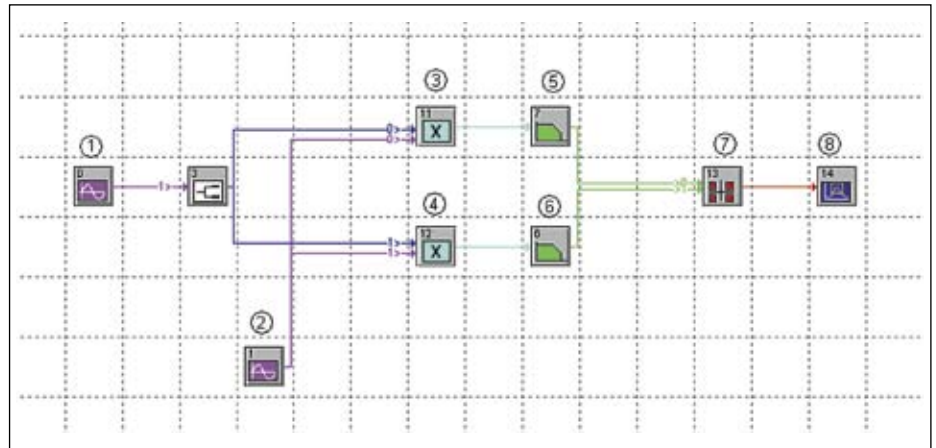


Рис. 3. Функциональная схема модели широкополосного тракта в приемниках с прямым преобразованием частоты

ного шага; N — количество шагов контроля; f_{cp} — частота среза АЧХ ФНЧ; t_0 — момент начала контроля; T_s — длительность шага контроля; K_{Γ_i} — коэффициент искажений ШКТ₁ на частоте f_s .

Для построения функциональной схемы модели контроля ШКТ₁ ПППЧ в окне System View отбираются следующие функциональные узлы:

- Генератор гармонического сигнала (ГС) и гетеродин (Γ) находятся по адресу: main libraries/source/periodic/sinusoid.
- Разветвитель находится по адресу: main libraries/RFanalog/Split/Combine/Psplit.
- Перемножитель находится по адресу: main libraries/multiplier.
- Баттервортовский фильтр нижних частот третьего порядка с частотой среза $f_{cp} = 10^5$ Гц находится по адресу: main libraries/SystemVue Analog Filter Library/Butterworth/Lowpass.
- Функциональный преобразователь находится по адресу: main libraries/Function/Functions/ArcTan 4.
- Индикатор находится по адресу: main libraries/Sink/Analysis/Analysis.

Меню параметров ГС, Γ и ФНЧ приведены на рис. 2.

При пошаговом контроле ШКТ₁ при $K_1 = K_2 = 1, \Delta\tau = 10^{-10}$ с, $\delta\varphi(f_{\delta}) = 2\pi f_s \Delta\tau$ моделирование осуществляется в виде последовательности из $N = 11$ с шагом $\Delta f_{ui} = 1$ мГц. Длительность моделирования на каждой частоте равна $T_M = T_s = 2 \times 10^{-3}$ с.

Функциональная схема модели для контроля ШКТ₁ приведена на рис. 3, где 1 — Γ_1 ; 2 — Γ_2 ; 3 — П₁; 4 — П₂; 5 — ФНЧ₁; 6 — ФНЧ₂; 7 — ФП; 8 — И.

В этой функциональной схеме ЛЗ заменяем установкой разных значений начальных фаз Γ_1 и Γ_2 . Для проведения моделирования необходимо открыть окно System Time Specification (рис. 4) и задать следующие параметры:

- **Sample Rate** — частота дискретизации f_{δ} ;
- **Start Time** — начало сеанса моделирования t_n ;

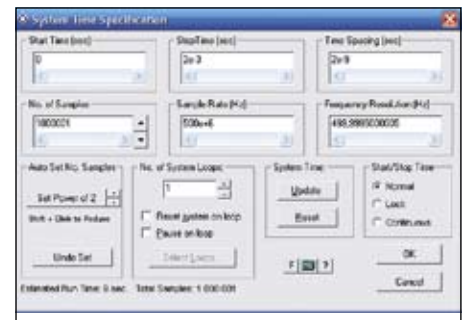


Рис. 4. Меню параметров системного моделирования

- **Stop Time** — конец сеанса моделирования t_k .

Частоту дискретизации выбираем из условия $f_{\delta} \approx 10f_s = 500 \times 10^6$ Гц. Длительность сеанса моделирования $T_M = t_k - t_n$ определяем из условия $T_M = T_s = 2 \times 10^{-3}$ с.

Результаты моделирования на каждом шаге контроля фиксируются индикатором в виде графической зависимости $K_{\Gamma}(f_s)$, на этом графике с помощью маркера определяется значение $K_{\Gamma}(f_s)$ при $t \leq 2 \times 10^{-3}$ с.

В качестве примера на рис. 5, где $y = U_s(T)/U_c(T)$ и $x = t$, приводятся результаты моделирования $K_{\Gamma}(f_s)$ при $f_s = 55$ мГц, $K_1 = K_2 (p = 1), \Delta\tau = 10^{-10}$ с. Поскольку $y = 0,017$, то коэффициент искажений равен $K_{\Gamma}(f_s) = -35,39$ дБ, что приемлемо для большинства задач с квадратурной обработкой информации.

Сеанс контроля состоит из 11 шагов, а его длительность составляет $T_k = 22 \times 10^{-3}$ с.

Результаты сеанса контроля фиксируются на всех шагах, что соответствует просмотру всего рабочего частотного диапазона, затем определяется тренд значений коэффициента искажений.

К недостаткам пошагового метода следует отнести зависимость длительности контроля от количества необходимых шагов. Этот недостаток можно устранить при переходе к панорамному методу контроля ШКТ₂, структура которого приведена на рис. 16.

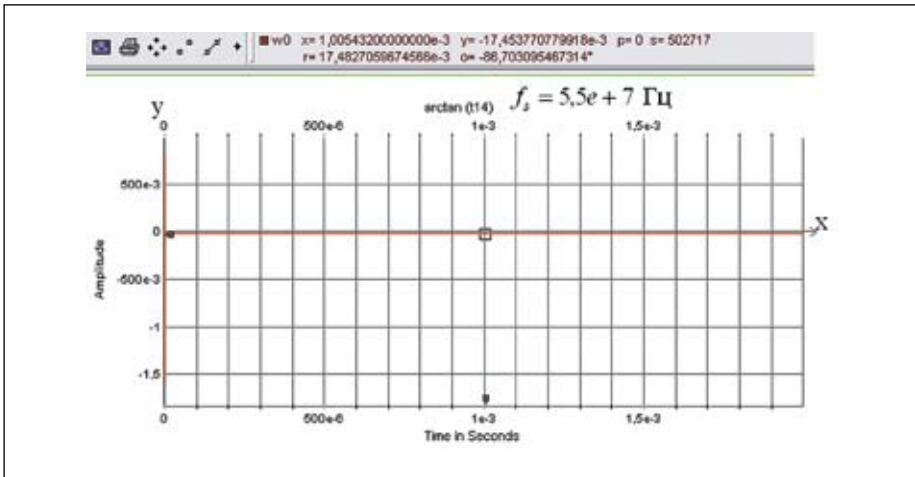


Рис. 5. Результаты моделирования при пошаговом контроле

При проведении панорамного контроля в качестве генератора сигналов используется генератор с линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) напряжением, который обеспечивает просмотр рабочего частотного диапазона ШКТ₂.

Для ситуации, когда величина $K_T(f)$ определяется фазовым рассогласованием, алгоритм контроля ШКТ₂ описывается следующими соотношениями:

$$U_c[T_i, f(t)] = \frac{K_{II} U_m^2}{2T} \int_0^T S(t) S(t-\tau) dt;$$

$$U_s[T_i, f(t)] = \frac{K_{II} U_m^2}{2T} \int_0^T S_{\perp}(t) S(t-\tau) dt;$$

$$S(t) = U_m \cos \left[2\pi f_n t + \frac{\varphi t^2}{2} \right];$$

$$S_{\perp}(t) = U_m \sin \left[2\pi f_n t + \frac{\varphi t^2}{2} - \Delta\varphi(f) \right]$$

при $t_0 + (i-1)\tau_u \leq t + i\tau_u$; $\varphi = 2\pi\beta$; $\beta = \Delta f_{\delta}/\tau_u$; $i \in [1, N]$; $\tau_u = T_s$; $f(t) = f_n + \beta t$; $T_n = N\tau_u$; $\Delta f_{\delta} = f_{\delta} f_n$; $\Delta\varphi(f) = 90^\circ + \delta\varphi(f)$; $K_T(f) = 20 \lg[(U_s(T, f))/ (U_c(T, f))]$ при $\tau = 0$.

Здесь $S(t)$ — ЛЧМ напряжение, формируемое генератором ЛЧМС; $U_s(T, f)$, $U_c(T, f)$ — напряжение на выходе ФНЧ₁ и ФНЧ₂; β — скорость перестройки частоты; $f(t)$ — закон перестройки частоты; f_n, f_{δ} — границы частотной перестройки; $\Gamma, \Delta f_{\delta}, \tau_u$ — девиация частоты и длительность импульса ЛЧМ напряжения; K_{II} — коэффициент передачи П₁ и П₂ размерностью 1/В; $\Delta\varphi(f)$ — ФЧХ ФВ; U_m — амплитуда ЛЧМС; $\delta\varphi(f)$ — фазовое рассогласование каналов; T, f_{cp} — постоянная времени и частота среза АЧХ ФНЧ; T_k — длительность сеанса контроля; N — количество циклов в сеансе контроля; T_s — длительность одного цикла перестройки частоты.

Для устранения динамических искажений в выходных эффектах частоту среза ФНЧ выбираем из соотношения: $f_{cp} = 2\sqrt{\beta} = 10^4$ Гц.

Для построения функциональной схемы модели контроля ШКТ₂ в окне **System** из библиотек пакета System Vue выбираем следующие функциональные узлы:

- Генератор ЛЧМС (Г). Его адрес: Main Libraries/Source/Periodic/Freq Sweep.
 - Разветвитель (Р). Его адрес: Main Libraries/RF/Analog/Splitters/Psplit-2.
 - Фазовращатель на 90° (ФВ). Его адрес: Main Libraries/Linear System/Filter/Fir/Hilbert 90.
 - Квадратор (Кв). Его адрес: Main Libraries/Function/Algebraic/X².
 - Фильтр нижних частот (ФНЧ). Его адрес: main libraries/SystemVue Analog Filter Library/Butterworth/Lowpass.
 - Функциональный преобразователь. Его адрес: main libraries/Function/Functions/ArcTan 4.
 - Индикатор (И). Его адрес: main libraries/Sink/Analysis/Analysis.
 - Линия задержки находится по адресу: main libraries/operator/delays/delay.
- Меню параметров ГС, ЛЗ и ФНЧ приведены на рис. 6.

Для всех вышеперечисленных моделей функциональных узлов вводятся параметры в соответствующих окнах с учетом технических требований модели для контроля ШКТ₂. Функциональная схема модели для контроля ШКТ₂ приведена на рис. 7, где 1 — ГС; 2 — Р; 3 — ФВ; 4 — П₁; 5 — ФНЧ₁; 6 — Р₂; 7 — П₂; 8 — ФНЧ₂; 9 — ФП; 10 — И.

Блок ФВ представляет собой фазовращатель на 90° параллельно подключенной ЛЗ, величина которой соответствует групповому запаздыванию Фв и равна 10⁻¹² с. Для проведения моделирования необходимо открыть окно **System Time Specification** (рис. 4) и задать следующие параметры:

- **Sample rate** — частота дискретизации;
- **Start time** — начало сеанса моделирования t_n ;
- **Stop time** — конец сеанса моделирования t_k .

При панорамном контроле ШКТ₂ моделирование осуществляется при использовании ГЛЧМС, функционирующего в частотном диа-

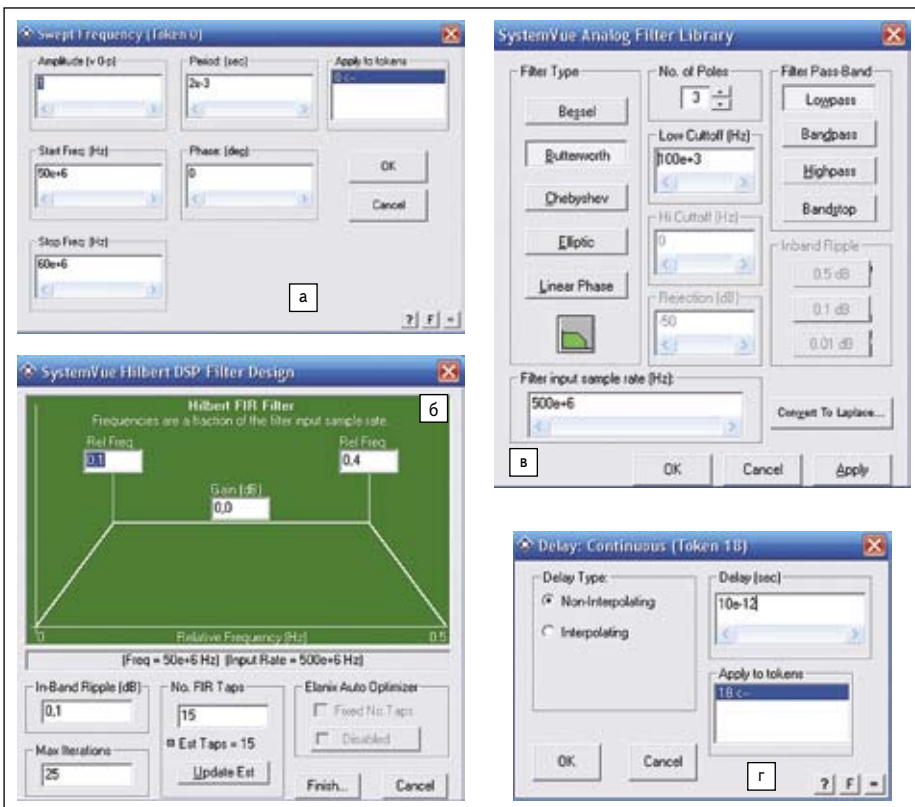


Рис. 6. Меню параметров: а) генератора линейно-частотно-модулированного сигнала; б, в) фильтра нижних частот; г) линии задержки при панорамном контроле

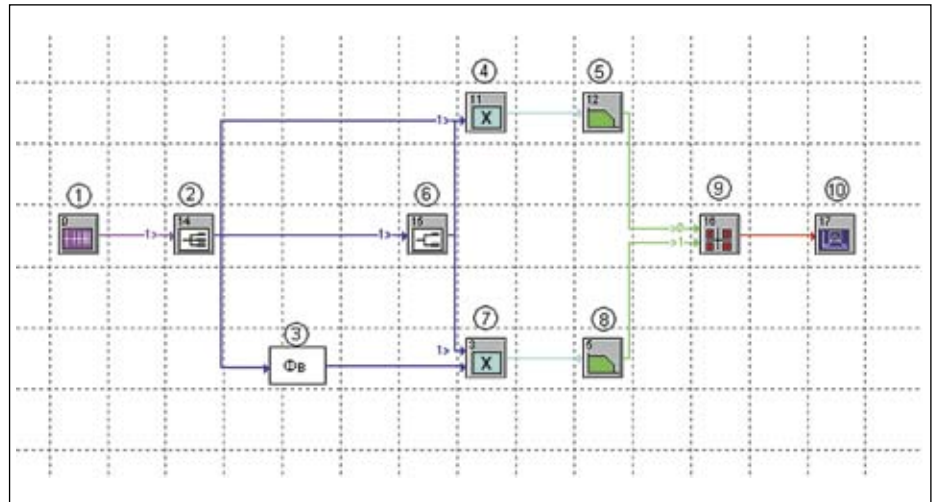


Рис. 7. Функциональная схема модели широкополосного тракта в автокорреляционных частотных дискриминаторах

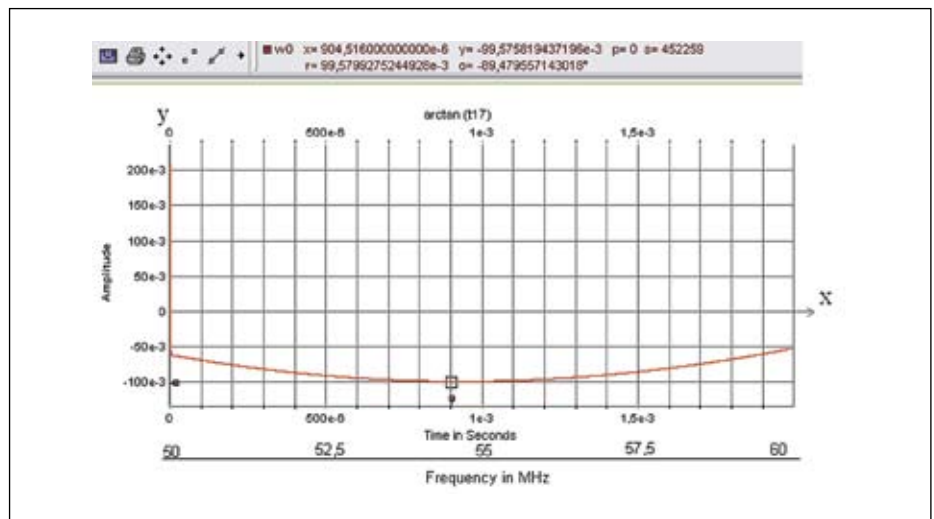


Рис. 8. Результаты моделирования при панорамном контроле

пазоне от 50×10^6 до 60×10^6 Гц с длительностью цикла перестройки частоты $T_s = \tau_u = 2 \times 10^{-3}$ Гц и равном времени моделирования T_M .

Величина частоты дискретизации существенно влияет на результаты моделирования АЧХ и ФЧХ Фв, в связи с чем при моделировании $f_d = 500 \times 10^6$ Гц. При использовании баттервортовского ФНЧ третьего порядка целесообразно выбирать частоту среза $f_{cp} = 10^4$ Гц.

Результаты моделирования фиксируются индикатором в виде графической зависимости $K_T(f) = 20 \lg[(U_s(T, f)) / (U_c(T, f))]$ (при этом $f_d = 500 \times 10^6$ Гц) и приведены на рис. 8.

С учетом вышеизложенного закон перестройки по частоте имеет вид $f(t) = (5 \times 10^7) + (5 \times 10^9)t$ при $0 \leq t \leq 2 \times 10^{-3}$ с. Коэффициент искажений при $\delta\phi(f) \ll 1$ рад равен $K_T(f) = 20 \lg \delta\phi(f)$. Из рис. 8 следует, что минимальное значение $y = 0,099$ при $x = f_s = 5,45 \times 10^7$ Гц, что соответствует коэффициенту искажений $K_{T2}(f) = -20,08$ дБ.

Этот вариант модели контроля ШКТ₂ обеспечивает существенное снижение времени контроля, которое составляет $T_s = 2 \times 10^{-3}$ с.

Заключение

Рассмотренные модели пошагового и панорамного контроля могут найти применение при эскизном проектировании широкополосных средств радиомониторинга с квадратурной обработкой информации, что необходимо для оценки аппаратурной погрешности при высоком уровне достоверности обработки информации. ■

Литература

1. Дятлов А. П., Емельянов Р. В., Колунтаев Е. Н. Цифровой приемник для радиомониторинга связанных сигналов // Специальная техника. 2010. № 2.
2. Дятлов А. П., Кульбикаян Б. Х. Радиомониторинг излучений спутниковых радионавигационных систем. М.: Радио и связь, 2006.
3. Загидулин Р. Ш., Карутин С. Н., Стешенко В. Б. SystemView — системотехническое моделирование устройств обработки сигналов. М.: Горячая линия – Телеком, 2005.