МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

В. А. ЗАЙЦЕВ

На правах рукописи

Структурно-сигнальные параметрические фильтры

№ 05.290—Теоретические основы радиотехники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1971

Министерство связи СССР

Ленинградский электротехнический институт связи
имени профессора М.А.Бонч-Бруевича

В.А.ЗАЙЦЕВ

На правах
рукописи

СТРУКТУРНО-СИГНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

№ 05.290 – Теоретические основы
радиотехники

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ленинград
1971

A67

Работа выполнена в Ленинградском электротехническом институте связи имени профессора М.А.Бонч-Бруевича.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор А.М.ЗАЕЗДНЫЙ.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Д.В.АГЕЕВ,
- доктор технических наук, профессор А.С.ВИНИЦКИЙ.

Ведущее предприятие - ______________

Автореферат разослан „16.04" 1971 года.

Защита диссертации состоится „20.05" 1971 года на заседании Учёного Совета факультетов РС и РВ, РТ и РК Ленинградского электротехнического института связи имени профессора М.А.Бонч-Бруевича по адресу: Ленинград, Д-65, наб.реки Мойки, дом 61, ауд.402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
канд.техн.наук,
доцент Р.Г.ЦАТУРОВА

В последнее десятилетие во всех областях, связанных с обработкой сигналов - связи, локации, измерениях - резко возрос интерес к параметрическим системам - линейным системам с переменными параметрами.

Известные преимущества этих систем, состоящие в сочетании возможностей использования как принципа суперпозиции, так и трансформации спектра, т.е. в сочетании особенностей линейных и нелинейных систем, прежде полностью не могли быть реализованы из-за чисто технологических трудностей; теперь же, в связи с последними достижениями в микроминиатюризации и в полупроводниковой технике, когда вопросы сложности цепей отступают на задний план, вопросы практического использования параметрических систем в связи, локации и других областях становятся все более актуальными.

К настоящему времени получили широкое распространение только параметрические усилители, а также адаптивные системы следящего приёма ЧМ-колебаний; последние предложены А.С.Виницким и подробно исследованы в работах Д.В.Агеева, А.С.Виницкого, Я.Г.Родионова и др. Практическое использование этих систем ясно показало перспективность всего направления, связанного с параметрическими цепями.

Указанные параметрические системы приспособлены к простейшим сигналам, т.е. к гармоническим сигналам с допущением о медленном изменении одного из параметров. В связи и локации в последние годы наметился широкий переход к относительно сложным сигналам и поэтому естественно поставить вопрос о создании параметрических цепей, "приспособленных" под эти сигналы.

Понятие "приспособление" нуждается в уточнениях; еще в 30-х годах Л.И.Мандельштам и Г.С.Горелик определили понятие "обобщенного резонанса" - реакции параметрической цепи на сложное колебание, аналогичной реакции обычного консервативного контура на гармоническое колебание.

Путь создания параметрических фильтров для сложных сигналов на основе понятия "обобщенного резонанса" представляется весьма перспективным и именно этой проблематике посвящена настоящая работа.

Предлагаемые параметрические фильтры соответствуют линейным дифференциальным уравнениям с переменными коэффициентами (параметрическим уравнениям); главной особенностью предлагаемых фильтров является то, что их параметры, т.е. коэффициенты уравнений, изменяются во времени по законам, определяемым не мгновенными значениями сигналов (как это имеет место в известных устройствах), а значениями связей между производными входного сигнала, так называемыми структурными связями.

Таким образом, обработка сигналов здесь осуществляется не по контурным, а по структурным свойствам и это обстоятельство является принципиальным.

В данной работе изложены теоретические основы построения предлагаемых структурно-сигнальных параметрических фильтров (ССПФ), дана рецептура их синтеза и приведены соответствующие примеры, описаны результаты экспериментального исследования ССПФ и намечены пути их практического использования.

Работа состоит из четырех глав, введения и заключения.

Глава первая посвящена разработке основ синтеза ССПФ. Здесь и в дальнейшем используются следующие обозначения:

I. производные κ -го порядка от функций времени

$$\frac{d^{\kappa}\varphi(t)}{dt^{\kappa}}=\varphi^{(\kappa)},\ \frac{d\varphi(t)}{dt}=\dot{\varphi},\ \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}=\ddot{\varphi};$$

2. свободные колебания фильтров

$$\varphi_p=\varphi_p(t),\ S_p=S_p(t),\ p=1,2,3\ldots;$$

3. колебания на выходе фильтров

$$y=y(t),\ z=z(t)\ ;$$

4. коэффициенты дифференциальных уравнений фильтров

$$a_{\kappa}=a_{\kappa}(t),\ q_{\kappa}=q_{\kappa}(t).$$

Структурно-сигнальные параметрические фильтры определяются как фильтры, установившийся отклик которых $y(t)$ на входное воздействие $u=u(t)$ принадлежит к тому же классу функций, что и входное воздействие. Так, если входное воздействие можно представить в виде:

$$u=\sum_{p=1}^{n}A_p\cdot S_p(t),\qquad (1)$$

где A_p - произвольные постоянные,
$S_p(t)$ - функции времени, то установившийся отклик ССПФ, по определению, равен

$$y(t)=\sum_{p=1}^{n}B_p\cdot S_p(t),\qquad (2)$$

где B_p - постоянные, определяемые типом фильтра и постоянными A_p. Если функции $S_p(t)$ являются решениями однородного дифференциального уравнения

$$z^{(n)}+\sum_{k=0}^{n-1} q_k(t) z^{(k)}=0 , \qquad (3)$$

то из определения ССПФ следует, что входное воздействие u и установившийся отклик фильтра y должны являться решениями этого уравнения.

При известных функциях $S_p(t)$ коэффициенты дифференциального уравнения q_k полностью известны и определяются соотношениями:

$$q_k(t)=-\frac{W_k(S)}{W(S)} , \qquad (4)$$

$$W(S)=\begin{vmatrix} S_1 & S_1^{(1)} & S_1^{(2)} & . & . & S_1^{(n-1)} \\ S_2 & S_2^{(1)} & S_2^{(2)} & . & . & S_2^{(n-1)} \\ . & . & . & . & . & . \\ S_n & S_n^{(1)} & S_n^{(2)} & . & . & S_n^{(n-1)} \end{vmatrix} , \qquad (5)$$

где $W(S)$ - определитель Вронского от функций, а $W_k(S)$ - определитель, получающийся из определителя Вронского, путем замены (K + I) столбца столбцом, состоящим из элементов

$$S_1^{(n)} S_2^{(n)} S_3^{(n)} . \; . \; S_n^{(n)} . \qquad (6)$$

Как следует из (4), конструкция коэффициентов определяется различными комбинациями производных от функций и выражает структурные свойства входного сигнала (I) и отклика ССПФ (2); именно поэтому рассматриваемые параметрические фильтры были названы структурно-сигнальными.

Чрезвычайно важным для подобных фильтров является определение обобщенного резонанса, введенное Л.И.Мандельштамом; для систем второго порядка Г.С.Гореликом были найдены математические соотношения, характеризующие этот обобщенный резонанс.

В первой главе диссертации понятие обобщенного резонанса и математические соотношения его определяющие распространяются на параметрические фильтры произвольного порядка.

Рассмотрим фильтр, описываемый дифференциальным уравнением

$$y^{(n)}+\sum_{k=0}^{n-1} a_k(t) y^{(k)}=\sum_{k=0}^{m} b_k(t) u^{(k)} , \qquad (7)$$

в котором коэффициенты a_k зависят не только от времени t, но и от некоторого коэффициента затухания α :

$$a_k = a_k(\alpha, t) .$$

Положим далее, что при отсутствии затухания ($\alpha = 0$), линейному однородному уравнению

$$z^{(n)}+\sum_{k=0}^{n-1} q_k(t) z^{(k)}=0 \qquad (8)$$

соответствуют свободные незатухающие колебания фильтра $S_p = S_p(t)$.

Здесь для сокращения письма принято обозначение

$$a_k(\alpha, t)=q_k(t) , \quad \alpha=0 . \qquad (9)$$

В соответствии с общим определением резонанса по Мандельштаму, действие внешнего резонансного воздействия $u = u_0(t)$ сводится к непрерывной компенсации затухания в фильтре (7), так что в нем возникают и поддерживаются незатухающие колебания:

$$z(t) = \sum_{p=1}^{n-1} B_p \cdot S_p(t). \qquad (I0)$$

Вычитая (8) из (7) найдем дифференциальное уравнение для резонансного входного воздействия $u_0(t)$:

$$\sum_{k=0}^{m} b_k u_0^{(k)} = \sum_{k=0}^{n-1} (a_k - q_k) z^{(k)}. \qquad (II)$$

Если известно уравнение фильтра (7) и свободные незатухающие колебания (I0), то из условия резонанса можно найти резонансное входное воздействие $u_0(t)$. Это задача анализа.

При синтезе ставится обратная задача: найти уравнение резонансного фильтра (7) для заданного входного воздействия. Как показывает соотношение (II), в такой общей постановке задачи синтеза может иметь бесчисленное множество решений, т.к. $2n+m+1$ величин связаны лишь одним условием (II).

Если ограничиться структурно-сигнальными параметрическими фильтрами, для которых по определению входное воздействие $u(t)$ и отклик $y(t)$ определяются суперпозицией только свободных колебаний $S_p(t)$, то задача синтеза приобретает единственность. В этом случае условие резонанса (II) дает определение зависимости между функциями S_p с одной стороны и коэффициентами a_k и b_k с другой. Эти зависимости имеют вид:

$$\sum_{k=1}^{n-1} (a_k - q_k) h_{jp}^{k} = b_0 \cdot C_{jp}, \quad j \neq p, \qquad (I2)$$

$$\sum_{k=1}^{n-1} (a_k - q_k) h_{pp}^{k} + (a_0 - q_0) = b_0 \cdot C_{pp}, \qquad (I3)$$

$$\sum_{k=1}^{m} b_k h_{jp}^{k} = b_0 D_{jp}. \qquad (I4)$$

Здесь: C_{jp}, D_{jp} - постоянные; коэффициенты h_{jp}^{k} полностью определяются функциями $S_p(t)$.

Приведенные соотношения позволяют по заданному резонансному воздействию (I) определить все коэффициенты дифференциального уравнения ССПФ (7) и тем самым осуществить синтез резонансных ССПФ произвольного порядка.

Далее на основе разработанной методики синтеза, подробно рассмотрен и осуществлен синтез ССПФ второго порядка, описываемых дифференциальным уравнением

$$\ddot{y} + a_1(t)\dot{y} + a_0(t)y = b_0(t)u. \qquad (I5)$$

При синтезе считается заданным входное воздействие, которое для уравнения (I5) даётся линейной комбинацией двух линейно-независимых колебаний со своими коэффициентами:

$$u = A_1 S_1(t) + A_2 S_2(t). \qquad (I6)$$

Полученное в первой главе уравнение ССПФ второго порядка имеет вид:

$$\ddot{y} + \left(2C \cdot \frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2} + \frac{S_1\ddot{S}_2 - \ddot{S}_1 S_2}{\dot{S}_1 S_2 - S_1\dot{S}_2}\right)\cdot\dot{y}$$
$$+ \left(\frac{\ddot{S}_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1\ddot{S}_2}{\dot{S}_1 S_2 - S_1\dot{S}_2} + C\,\frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2}\left(C\,\frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2} - 2\,\frac{S_1\dot{S}_1 + S_2\dot{S}_2}{S_1^2 + S_2^2}\right)\right)\cdot y = \qquad (I7)$$
$$= C_1\left(\frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2}\right)^2 \cdot u.$$

Здесь C и C_1 – произвольные постоянные.

Из (17) следует, что коэффициенты дифференциального уравнения ССПФ являются функциями различных структурных связей колебаний $S_1(t)$, $S_2(t)$.

Эти связи и обеспечивают адекватную фильтрацию входного колебания (16); другими словами – установившийся отклик фильтра описывается такой же линейной комбинацией

$$y = B_1 S_1(t) + B_2 \cdot S_2(t)$$

и, кроме того, выполняется условие обобщенного резонанса.

Свободные колебания ССПФ (17) определяются выражениями:

$$\varphi_1(t) = C_3 \cdot S_1(t) \exp\left[-C\int \frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2} \cdot dt\right],$$

$$\varphi_2(t) = C_4 \cdot S_2(t) \exp\left[-C\int \frac{S_1\dot{S}_2 - \dot{S}_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2} \cdot dt\right].$$

В первой главе приведены примеры ССПФ для АМ, ЧМ и АМ-ЧМ колебаний.

Например, для АМ-ЧМ колебания

$$u = U_0 v(t) \sin \omega\tau(t) \qquad (18)$$

получено следующее дифференциальное уравнение ССПФ:

$$\ddot{y} + \left(2\alpha\dot{\tau} - \frac{\ddot{\tau}}{\dot{\tau}} - 2\frac{\dot{v}}{v}\right)\cdot\dot{y} + \qquad (19)$$

$$+\left(\omega_0^2\dot{\tau}^2 - \frac{\ddot{v}}{v} - 2\alpha\dot{\tau}\frac{\dot{v}}{v} + 2\frac{\dot{v}^2}{v^2} + \frac{\dot{v}\ddot{\tau}}{v\dot{\tau}}\right)y = \omega_0^2\dot{\tau}^2 u.$$

Выводы по первой главе

1. Введено понятие о структурно-сигнальных параметрических фильтрах и дано их определение; понятие обобщенного резонанса распространено на параметрические фильтры произвольного порядка.

2. Разработана методика синтеза резонансных ССПФ произвольного порядка.

3. На основе разработанной методики осуществлен синтез ССПФ второго порядка и даны примеры ССПФ для АМ, ЧМ, АМ-ЧМ колебаний.

Вторая глава посвящена исследованию фильтрующих свойств, найденных в первой главе ССПФ второго порядка. Здесь рассматриваются вопросы прохождения через ССПФ различных сигналов и помех.

Показано, что ССПФ воспринимает адекватное ему колебание, как простейшее. Частотная характеристика ССПФ в приведенной шкале частот, введенной А.С.Виницким, подобна частотной характеристике консервативного колебательного контура. Так, отклик фильтра (19) на входное воздействие (18) описывается выражением

$$y(t) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \tilde{\omega}^2)^2 + (2\alpha\tilde{\omega})^2}} \cdot U_0 v(t) \sin[\tilde{\omega}\tau(t) + \theta],$$

которое подобно соответствующему выражению для консервативного колебательного контура, но частота $\tilde{\omega}$ здесь является приведенной.

Так как к АМ-ЧМ колебаниям (18) можно привести большинство радиотехнических сигналов $S_p(t)$, то отсюда следует, что уравнение (19) описывает широкий класс параметрических фильтров. В самом деле, предположим, что требуется построить ССПФ для колебаний вида

$$u = C_1 S_1(t) + C_2 \cdot S_2(t), \qquad (20)$$

где C_i - произвольные коэффициенты, а $S_i(t)$ - заданные колебания.

Представим колебания $S_i(t)$ в виде АМ-ЧМ колебаний

$$S_1(t) = v(t) \sin \omega_0 \tau(t), \qquad S_2(t) = v(t) \cos \omega_0 \tau(t), \qquad (21)$$

по которым можно найти функции $v(t), \tau(t)$, управляющие параметрами фильтра

$$v^2(t) = S_1^2(t) + S_2^2(t), \qquad tg\,\omega_0 \tau(t) = \frac{S_1(t)}{S_2(t)} \qquad (22)$$

Отклик фильтра (I9) на входное воздействие (20) будет иметь вид:

$$y = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \tilde{\omega}^2)^2 + (2\alpha\tilde{\omega})^2}} \cdot C\left[S_1 \cos(\psi+\theta) + S_2 \sin(\psi+\theta)\right], \qquad (23)$$

$$tg\,\theta = \frac{2\alpha\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}^2 - \omega_0^2}, \quad tg\,\psi = \frac{C_2}{C_1}. \qquad (24)$$

Выражение (2?) показывает, что для каждой из составляющих S_1 и S_2 избирательные свойства фильтра по приведенной частоте такие же, как и у консервативного колебательного контура для составляющих $\sin\omega t, \cos\omega t$.

Анализ прохождения различных колебаний через ССПФ производился путем нахождения их спектров в системе координат, соответствующих приведенным частотам. Так для АМ-ЧМ ССПФ (I9) входные сигналы представляются в виде ряда (интеграла) Фурье

$$u(t) = v(t)\left\{\frac{1}{2}d_0 + \sum_{m=1}^{\infty}\left[d_m \cos m\omega\tau(t) + g_m \sin m\omega\tau(t)\right]\right\}. \qquad (25)$$

Найдя приведенный спектр входного воздействия и, зная приведенную частотную характеристику ССПФ, можно известными методами, найти отклик фильтра на это входное воздействие. Таким путем было изучено прохождение гармонических колебаний через ССПФ и рассмотрено явление кратного резонанса.

При конкретных функциях $v(t)$, $\dot{\tau}(t)$:

$$v(t) = \dot{\tau}(t) = 1 + \beta\cos\Omega t$$

найден отклик ССПФ на входное гармоническое воздействие

$$u = U_0 \sin\gamma t$$

на частотах кратного резонанса

$$\gamma_0 = \omega_0 \pm n\Omega$$

Этот отклик определяется выражением

$$y(t) = \frac{\omega_0}{2\alpha} \cdot U_0 \cdot v(t) J_n\left(\beta\frac{\omega_0}{\Omega}\right)\cos\omega_0\tau(t), \qquad (26)$$

где J_n - функция Бесселя первого рода.

Из выражения (26) следует, что ССПФ воспринимает синусоиду, как сложное колебание и разлагает её на собственные колебания.

Таким же путем рассмотрено прохождение импульсных колебаний и помех. Найдено, что ССПФ обладает хорошей помехоустойчивостью по отношению к импульсным помехам.

Далее, во второй главе, анализируется прохождение флуктуационных помех через ССПФ. При "белом" шуме на входе, шум на выходе ССПФ описывается собственными колебаниями фильтра:

$$u_ш = U v(t) \sin[\omega_0\tau(t) + \psi] \qquad (27)$$

со случайной амплитудой U и фазой ψ. В приведенной шкале частот шум на выходе фильтра является узкополосным нормальным нестационарным шумом, среднеквадратичное значение которого даётся оценкой:

$$\overline{U_ш^2} \leqslant \frac{\pi}{2} \cdot N_0 \cdot \Delta\tilde{f}_0 \cdot V^2(t) \left|\frac{\dot{\tau}}{V^2}\right|_{max}. \qquad (27)$$

Выражение (27) справедливо в установившемся режиме; здесь N_0 - спектральная плотность шума на входе ССПФ.

Из этого выражения следует, что мощность шума на выходе ССПФ определяется главным образом шириной полосы $\Delta\tilde{f}_0$ пропускания ССПФ в приведенной шкале частот.

Выигрыш в отношении сигнал-шум, даваемый ССПФ, равен

$$\frac{(P_c/P_ш)_{вых}}{(P_c/P_ш)_{вх}} \geqslant \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\Delta f_c}{\Delta\tilde{f}_0} \cdot \frac{1}{V^2(t)\left|\frac{\dot{\tau}}{V^2}\right|_{max}}. \qquad (28)$$

Здесь: Δf_c - ширина спектра сигнала, а $\Delta\tilde{f}_0$ - полоса пропускания фильтра в приведенной шкале частот.

Отсюда следует, что ССПФ даёт существенный выигрыш при использовании широкополосных сигналов, когда имеет место сильное неравенство

$$\Delta f_c \gg \Delta\tilde{f}_0 .$$

Объясняется это тем, что ССПФ воспринимает адекватное ему широкополосное колебание, как простейшее; полоса пропускания фильтра $\Delta\tilde{f}_0$ в приведенной шкале частот определяется максимальной частотой спектра сообщения, а для несущего колебания - только одной спектральной линией. В то же время, мощность шума на входе ССПФ пропорциональна широкой полосе неприведенных частот спектра входного несущего колебания, а на выходе - узкой полосе приведенных частот. Благодаря этому имеет место выигрыш в отношении сигнал-шум, пропорциональный отношению

$$\frac{\Delta f_c}{\Delta\tilde{f}_0}.$$

<u>Выводы по второй главе</u>

1. Изучены фильтрующие свойства ССПФ; в частности, рассмотрено прохождение АМ-ЧМ колебаний, гармонических и импульсных колебаний, сосредоточенных (по времени и спектру) и флуктуационных помех. Изучено прохождение резонансных сигналов в смеси с помехами и помехоустойчивость ССПФ.

2. Показано, что ССПФ обладают хорошей помехоустойчивостью ко всем видам помех при широкополосных входных сигналах. Изучение прохождения сигналов и помех проведено на базе разложения колебаний в ряды по собственным колебаниям ССПФ, т.е. путем нахождения спектров колебаний в системе координат соответствующих приведенным частотам.

В т р е т ь е й г л а в е обсуждаются некоторые возможные применения ССПФ в измерительной технике, технике связи и наблюдения.

Здесь рассмотрены вопросы генерирования сигналов сложной формы, в том числе, широкополосных шумоподобных сигналов, и возможность эффективного разделения этих сигналов с помощью ССПФ. Для примера, набор широкополосных колебаний с перекрывающимися спектрами можно записать в виде

$$u_k = U_0(1+\beta\cos\Omega t)\sin(\omega_0+k\Omega)\left(t+\frac{\beta}{\Omega}\sin\Omega t\right). \qquad (29)$$

Так как в приведенной шкале частот спектры этих колебаний не перекрываются, то смесь этих колебаний $u=\sum u_k$ с помощью ССПФ можно разделить на отдельные составляющие.

Так как ССПФ воспринимают адекватные им колебания, как простейшие и пропускают их без искажения формы, независимо от ширины их спектра, и обладают хорошей помехоустойчивостью к сосредоточенным флуктуационным помехам, то эти фильтры могут служить основой для построения систем связи.

В системе связи для передачи непрерывных сообщений в качестве несущих можно использовать АМ-ЧМ колебания с перекрывающимися спектрами, например, колебания (29).

Так как спектры несущих канальных колебаний перекрываются, то эта система связи по существу будет являться системой со свободным доступом, т.е. без регламентации по частоте и времени (конечно в пределах, являющихся общими для всех сигналов данной системы). Для передачи сообщений в этой системе связи могут быть использованы известные виды модуляции:

АМ-сигнал

$$u_\kappa = U_0 [1+m_1 x_\kappa(t)] v(t) \sin \omega_\kappa \tau(t) ; \qquad (30)$$

ЧМ-сигнал

$$u_\kappa = U_0 v(t) \sin\left[\omega_\kappa \tau(t) + m_2 \int x_\kappa(t) dt\right] ; \qquad (31)$$

ФМ-сигнал

$$u_\kappa = U_0 v(t) \sin\left[\omega_\kappa \tau(t) + m_3 x_\kappa(t)\right] . \qquad (32)$$

Выигрыш в отношении сигнал-шум, получаемый в каждом канале только за счёт применения ССПФ (до детектора) равен

$$\eta \simeq \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta f_c}{\Delta f_0} . \qquad (33)$$

Величина η , например, при радиовещании на коротких волнах может составлять несколько сотен.

Здесь необходимо обратить внимание, что этот выигрыш получается в тракте в.ч. и не связан с видом модуляции несущих полезным сигналом, которая в свою очередь при ЧМ и ФМ даст, как обычно, свой дополнительный выигрыш по сравнению с АМ.

В системе связи, построенной на основе использования ССПФ, должна быть обеспечена синхронизация.

В частности, сигналы управления параметрами фильтра $v(t)$ и $\dot{\tau}(t)$, могут передаваться по одному из каналов или же генерироваться на приёмном конце. Описанная выше система связи является следящей в том смысле, что детерминированная АМ-ЧМ основа несущих колебаний отслеживается ССПФ. Можно пойти по этому пути и дальше, как это предлагалось А.С.Виницким, а именно ввести ещё самосинфазированные ССПФ. В этом случае, как известно, можно получить дополнительный выигрыш за счёт сужения полосы пропускания ССПФ. Применительно к модулированным фильтрам этот вопрос исследовался Д.В.Агеевым, А.С.Виницким. Их выводы почти целиком могут быть применены к ССПФ.

На основе ССПФ можно строить и систему связи для передачи дискретной информации. Если применять ССПФ с коммутируемой добротностью, которая максимизируется к моменту прихода сигнала и минимизируется после отсчёта, то выигрыш в отношении сигнал-шум будет определяться выражением

$$\eta = \frac{(P_c/P_ш)_{вых}}{(P_c/P_ш)_{вх}} = const \frac{\tau^2(T)}{N_0 \cdot T} , \qquad (34)$$

которое по мере увеличения времени наблюдения T растет.

Вероятность ошибки в такой системе связи оказалось равной:

$$2 \cdot P_{ош} \leqslant \left[1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{E}{2N_0(1+\beta)}}\right)\right] . \qquad (35)$$

Из последнего выражения следует, что при белом шуме ССПФ позволяют реализовать помехоустойчивость, близкую к потенциальной; однако при этом имеет место улучшенная помехозащищенность по отношению к сосредоточенным во времени и по спектру помехам.

Целый ряд возможностей использования ССПФ можно предложить в непрерывной радиолокации, в различных доплеровских системах.

При $v(t)=const$ уравнение (19) принимает вид:

$$\ddot{y}+\left(2\alpha\dot{\tau}-\frac{\ddot{\tau}}{\dot{\tau}}\right)\dot{y}+\omega_0^2\dot{\tau}^2 y=\omega_0^2\dot{\tau}^2 u \quad (36)$$

Этот фильтр адекватен ЧМ колебаниям

$$u=U_0\sin\omega\tau(t), \quad (37)$$

причем уравнение справедливо при любых законах изменения $\tau(t)$, глубины и скорости модуляции. Иными словами, ССПФ, описываемый (36), является идеальным модулированным фильтром. Этот фильтр позволяет решать не только все те задачи, которые решаются с помощью модулированных фильтров в доплеровских системах, но и ряд новых задач, связанных с большой глубиной модуляции и быстрыми изменениями параметра зондирующих ЧМ сигналов (37), т.е. задачи определения скорости и дальности на малых расстояниях. С помощью ССПФ можно довольно просто, например, реализовать систему определения дальности, предложенную Армстронгом.

Выводы по третьей главе

1. Показана возможность генерирования и эффективного разделения колебаний сложной формы с помощью ССПФ, в том числе и разнообразных широкополосных колебаний с перекрывающимися спектрами.

2. Показана возможность построения с помощью ССПФ следящих систем связи для передачи как аналоговых, так и дискретных сообщений. Эти системы связи, являющиеся системами со свободным доступом, обладают хорошей помехозащищенностью к сосредоточенным и флуктуационным помехам.

3. Показана возможность использования ССПФ в радиолокации, в доплеровских системах, где они в принципе позволяют решать задачи наблюдения параметров близких объектов, или же объектов, перемещающихся с большими скоростями.

Глава четвертая посвящена экспериментальной проверке возможности реализации ССПФ и его фильтрующих свойств. Здесь рассмотрена возможность реализации ССПФ с помощью электронных моделей; показано, что по мере развития интегральных микроэлектроники и больших интегральных схем, этот путь реализации будет находить все большее практическое применение.

Второй путь реализации ССПФ связан с применением параметрического LC-контура. Показано, что ССПФ для колебаний вида

$$u=U_0\dot{\tau}(t)\sin\omega\tau(t) \quad (38)$$

можно реализовать в виде параметрического контура, индуктивность и емкость которого изменяются по закону

$$L(t)=\frac{L_0}{\dot{\tau}(t)}, \quad C(t)=\frac{C_0}{\dot{\tau}(t)}. \quad (39)$$

Добавление в эту схему дифференцирующего и интегрирующего каскадов, емкость в которых изменяется по закону

$$C(t)=\frac{C_0}{v(t)},$$

позволяет получить реализацию ССПФ для АМ-ЧМ колебаний

$$u=Uv(t)\sin\omega\tau(t).$$

Возможен целый ряд других модификаций этих схем. В частности, в работе рассмотрены различные схемы, не содержащие нелинейных индуктивностей. Такие схемы очень важны, т.к. позволяют реализовать их в виде интегральных схем.

Экспериментальная проверка фильтрующих свойств ССПФ проводилась на электронных моделях, реализуемых на аналоговых ЭВМ, ЭЦВМ, на УПТ в интегральном исполнении и лучевых функциональных перемножителях (ЛФ).

Экспериментально были изучены следующие вопросы:

1. Генерирование колебаний сложной формы,
2. Прохождение адекватных колебаний через ССПФ,
3. Приведенные частотные характеристики ССПФ,
4. Разделение широкополосных колебаний с перекрывающимися спектрами,
5. Прохождение сосредоточенных по времени и спектру помех,
6. Прохождение флуктуационных помех,
7. Помехоустойчивость ССПФ по отношению к различного рода помехам,
8. Вероятность ошибок в дискретной системе связи на ССПФ.

Экспериментальное изучение всех этих вопросов подтвердило теоретические результаты работы и показало, что:

1. ССПФ можно сравнительно просто реализовать,
2. С помощью ССПФ можно производить эффективное разделение колебаний сложной формы с перекрывающимися спектрами,
3. ССПФ обладают хорошей помехоустойчивостью по отношению к сосредоточенным и флуктуационным помехам.

Краткие результаты работы сводятся к следующему.

1. Введен новый класс фильтров с переменными параметрами - структурно-сигнальные параметрические фильтры. Дано определение ССПФ и установлены зависимости между коэффициентами дифференциального уравнения ССПФ и входными сигналами. Коэффициенты дифференциальных уравнений ССПФ содержат информацию о структурных свойствах входных воздействий.

2. Понятие обобщенного резонанса распространено на линейные параметрические фильтры произвольного порядка. Установлены зависимости, определяющие законы изменения коэффициентов дифференциальных уравнений резонансных параметрических фильтров. На основе критерия обобщенного резонанса разработана методика синтеза резонансных ССПФ.

Подробно рассмотрена методика синтеза ССПФ второго порядка и приведены примеры синтеза ССПФ для АМ, ЧМ, АМ-ЧМ колебаний.

3. Изучены фильтрующие свойства ССПФ второго порядка; показано, что ССПФ воспринимает адекватное ему колебание, как простейшее и пропускает его без искажения формы.

Резонансные свойства ССПФ подобны резонансным свойствам консервативного колебательного контура. Приведенная частотная характеристика ССПФ совпадает с резонансной характеристикой LC -контура.

4. На основе нахождения спектров входных сигналов в системе координат, соответствующих приведенным частотам, изучено прохождение различных сигналов и помех через ССПФ: гармонических, импульсных, флуктуационных. Показано, что в ССПФ наблюдается явление кратного резонанса при действии на фильтр гармонических и импульсных колебаний.

Изучена помехоустойчивость ССПФ по отношению к сосредоточенным и флуктуационным помехам. Показано, что ССПФ обладает хорошей помехоустойчивостью по отношению к этим видам помех и что помехоустойчивость ССПФ тем выше, чем более широкополосными являются входные сигналы.

5. Рассмотрены возможные применения ССПФ.

Показана возможность эффективного применения ССПФ для генерирования и разделения различных колебаний сложной формы, в том числе и широкополосных колебаний с перекрывающимися спектрами.

Показана возможность построения следящих систем связи для передачи дискретной и аналоговой информации и показано, что системы связи на ССПФ позволяют получать значительный выигрыш в отношении сигнал-шум без расширения полосы частот многоканального сигнала. Аналоговые и дискретные системы связи на белом шуме реализуют помехоустойчивость, близкую к потенциальной, и в то же время обладают хорошей помехоустойчивостью по отношению к сосредоточенным во времени и по спектру помехам.

Показана возможность и эффективность применения ССПФ в радиолокации, в различных допплеровских системах.

6. Фильтрующие свойства ССПФ изучены экспериментально. Рассмотрены различные способы реализации ССПФ на аналоговых моделях и на нелинейных LC - элементах.

Изучено прохождение "резонансных" колебаний, гармонических, импульсных и флуктуационных помех. Экспериментально изучена помехоустойчивость ССПФ. Произведено сравнение экспериментальных данных с теорией. Экспериментальные данные и теоретические результаты хорошо согласуются.

Экспериментальная проверка ССПФ подтвердила возможность применения ССПФ для генерирования и разделения колебаний различной сложной формы, в том числе, и широкополосных колебаний с перекрывающимися спектрами, возможность эффективной фильтрации колебаний без искажения формы при различных сосредоточенных и флуктуационных помехах.

Проведенные исследования позволяют надеяться, что дальнейшее развитие работ по структурно-сигнальным параметрическим фильтрам позволит реализовать на основе их использования системы связи, измерения и радиолокации с улучшенными характеристиками.

Результаты работы докладывались:

1. На секции теории линейных электрических цепей НТОРЭС им.А.С.Попова, г.Ленинград, в марте 1970г.
2. На секции статистической радиотехники НТОРЭС им. А.С.Попова, г.Ленинград, октябрь 1970г.
3. На третьем Всесоюзном Симпозиуме по помехоустойчивым методам приёма ЧМ и ФМ, г.Куйбышев, КЭИС, ноябрь 1970г.
4. На научном семинаре в Горьковском политехническом институте, февраль 1971г.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. З а й ц е в В.А. Разделение сигналов по структурным свойствам с помощью параметрических фильтров. Тезисы докладов XXIУ областной научно-технической конференции, посвященной Дню Радио и Дню Связиста. Ленинград, апрель, 1969.

2. З а й ц е в В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование структурно-сигнального параметрического фильтра. Тезисы докладов XXУ юбилейной научно-технической конференции, посвященной 75-летию изобретения радио. Май, 1970. Ленинград.

3. З а е з д н ы й А.М., З а й ц е в В.А. Структурно-сигнальные параметрические фильтры и их использование для разделения сигналов. Радиотехника, т.26, № 1, 1971.

4. З а е з д н ы й А.М., З а й ц е в В.А. Синтез структурно-сигнальных параметрических фильтров. В сб. "Современные методы и средства разделения сигналов". Изд.ЛЭИС, 1971.

5. Зайцев В.А. Экспериментальное исследование структурно-сигнальных параметрических фильтров. В сб. "Современные методы и средства разделения сигналов." Изд.ЛЭИС, 1971.

6. Зайцев В.А., Кропивницкий А.Д. Теоретическое изучение влияния помех на структурно-сигнальный параметрический фильтр. Труды научно-технической конференции ЛЭИС, 1971, (тезисы).

7. Зайцев В.А., Кропивницкий А.Д. Некоторые результаты экспериментального исследования влияния помех на структурно-сигнальный параметрический фильтр. Труды научно-технической конференции ЛЭИС, 1971, (тезисы).

Ротапринт. Типография ЛЭИС, г. Красное Село

Зак. 381 Объем 1 1/2 печ. л. Тираж 125 экз. г.

Бесплатно М-07544, 31/III-1971 г.