дит подавление полезного сигнала до уровня шумов квантования и ниже, а значит, в этом случае преимущества АПФ без ЛО не могут быть реализованы.

1. *Белинский В. Т., Бочаров В. Е., Константиновский А. Г., Кудинов А. В.* Оценка пространственно-избирательных свойств по сигналу адаптивной антенной решетки // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Радиотехника. 1981. Вып. 18. С. 45—47. 2. *Грифитс Л.* Простой адаптивный алгоритм для обработки сигналов антенных решеток в реальном времени // ТИИЭР. 1969. Т. 57. С. 6—15. 3. *Уидроу Б., Мантей П., Грифитс Л., Гуд Б.* Адаптивные антенные системы//ТИИЭР. 1967. Т. 55. С. 78—95. 4. *Фрост III.* Алгоритм линейно-ограниченной обработки сигналов в адаптивной решетке // ТИИЭР. 1972. Т. 60. С. 5—16. 5. *Applebaum S., Chapman D.* Adaptive arrays with main beam constraints // IEEE Trans. 1976. Vol. AP - 24, N 5. P. 650—662.

Поступила в редколлегию 20.09.84

УДК 621.317.757

Н. Ф. ВОЛЛЕРНЕР, д-р техн. наук, А. Ю. МИХАЦКИЙ, студ.

АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛОВ В ДИСПЕРСИОННОМ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ

Спектр непрерывно следующих один за другим участков реализации узкополосного сигнала измеряют дисперсионными спектральными анализаторами (СА). Это можно рассматривать как измерение спектра последовательности радиоимпульсов. Выходные отклики дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) от смежных реализаций не должны перекрываться во времени, т. е. длительность анализа не должна превышать длительность участка реализации [3].

Ко входам смесителя спектроанализатора на ДЛЗ подводится участок реализации — радиоимпульс $e(t)$ длительностью $T_{\text{ан}}$ и гетеродинное напряжение $u_{\text{г}}(t)$ от генератора с периодически линейно изменяющейся частотой; период линейной частотной модуляции (ЛЧМ) генератора $T_{\text{ЧМ}} \geqslant T_{\text{ан}}$

$$e(t) = U_{\text{c}}(t)\cos(\omega_{\text{c}}t + \varphi_{\text{c}}), \quad 0 < t < T_{\text{ан}}; \qquad u_{\text{г}}(t) = U_{\text{г}}\cos(\omega_{\text{г}}t + \\ + \pi\Delta f_{\text{ЛЧМ}}t^2/T_{\text{ЧМ}}); \quad f_{\text{г}}(t) = (1/2\pi)(\omega_{\text{г}} + 2\pi\Delta f_{\text{ЛЧМ}}t/T_{\text{ЧМ}}).$$

Напряжение промежуточной частоты $f_{\text{c}} - f_{\text{г}}(t)$ на выходе умножителя — входе ДЛЗ — $s(t)$ и его спектральная функция $S_{\text{вх}}(\omega)$ ($U_{\text{c}}(t) = 0$ при $t < 0$, $t > T_{\text{ан}}$) будут равны

$$s(t) = U_{\text{c}}(t)\,U_{\text{г}}\cos[(\omega_{\text{c}} - \omega_{\text{г}})t - \pi\Delta f_{\text{ЛЧМ}}t^2/T_{\text{ЧМ}} + \varphi_{\text{c}}]; \tag{1}$$

$$\mathbf{S}_{\text{вх}}(\omega) = S_{\text{вх}}(\omega)\exp[j\psi(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda)\exp(-j\omega\lambda)\,d\lambda = \\ = U_{\text{г}}\int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{c}}(\lambda)\cos[(\omega_{\text{c}} - \omega_{\text{г}})\lambda - \pi\Delta f_{\text{ЛЧМ}}t^2/T_{\text{ЧМ}} + \varphi_{\text{c}}]\exp(-j\omega\lambda)\,d\lambda \tag{2}$$

Выходное напряжение ДЛЗ $u_{вых}(t)$ находят обратным преобразованием его спектральной функции $\mathbf{S}_{вых}(\omega) = \mathbf{S}_{вх}(\omega)\cdot\mathbf{K}(\omega)$ [1]; $\mathbf{K}(\omega)$ — передаточная функция ДЛЗ. Для идеальной ДЛЗ

$$\mathbf{K}(\omega) = K_0 \exp[j\beta(\omega)]; \qquad \beta(\omega) = a(\omega - \omega_н)^2 + \tau_0(\omega - \omega_н), \tag{3}$$

где K_0 — постоянная; $f_н = \omega_н/2\pi$ — низшая частота полосы пропускания ДЛЗ; $2a$ — дисперсия; τ_0 — начальное групповое время.

В соответствии с принципом работы СА на ДЛЗ каждый компонент спектра исследуемого сигнала $e(t)$ частоты $f_{с1}$, преобразованный на промежуточную частоту $f_{п1} = f_{с1} - f_г(t)$, образует ЛЧМ колебание длительностью $T_{ан}$. Для согласованной обработки — сжатия ЛЧМ сигнала промежуточной частоты (1) в ДЛЗ — скорость изменения его частоты должна по абсолютному значению соответствовать дисперсии ДЛЗ (3), но с обратным знаком; полагая $T_{ан} = T_{ЧМ}$, имеем

$$2a = T_{ЧМ}/(2\pi\Delta f_{ЛЧМ}) = T_{ан}/(2\pi\Delta f_{ЛЧМ}). \tag{4}$$

Для разных частот компонент исследуемого сигнала f_{ci} в пределах от $f_{c\min}$ до $f_{c\max}$ $(f_{c\max} - f_{c\min}) = \Delta f_{сП}$ значение промежуточной частоты $f_{Пi}$ дополнительно изменяется, что изменяет групповое время запаздывания компонент. Подключив выход ДЛЗ, например, к осциллографическому индикатору и синхронизировав его развертку с работой ЛЧМ генератора, на экране индикатора наблюдают спектр реализации исследуемого сигнала $e(t)$.

Полосу пропускания ДЛЗ с передаточной функцией (3) $П_{ДЛЗ}$ выбирают так, чтобы оптимально обрабатывать колебания промежуточной частоты, обусловленные любыми частотными компонентами сигнала в пределах $f_{c\min} \dots f_{c\max}$[1]: $П_{ДЛЗ} \geqslant \Delta f_{ЛЧМ} + \Delta f_{сП} \approx 2\Delta f_{сП}$.

Найдем далее выходное напряжение ДЛЗ $u_{вых}(t)$, подставив в выражение (2) $\pi\Delta f_{ЛЧМ}/T_{ЧМ} = 1/(4a)$,

$$u_{вых}(t) = U_г/(2\pi)\int_{-\infty}^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty} U_c(\lambda)\cos[(\omega_c - \omega_г)\lambda - \lambda^2/(4a) + \varphi_c]\, e^{-j\omega\lambda}d\lambda\right]\mathbf{K}(\omega)\, e^{-j\omega t}d\omega.$$

Заменив порядок интегрирования, перейдя к комплексному представлению напряжения $s(t)$ (1) и отбросив составляющую с отрицательными частотами, получим

$$u_{вых}(t) = U_г/(2\pi)\int_{-\infty}^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty} U_c(\lambda)\exp[j(\omega_c - \omega_г)\lambda - j\lambda^2/(4a) - j\omega\lambda + j\varphi_c]d\lambda\right]\times$$
$$\times K_0\exp[-ja(\omega - \omega_н)^2 + j\tau_0(\omega - \omega_н) + j\omega t]\, d\omega =$$

---

[1]Применяют и СА на ДЛЗ, у которых $П_{ДЛЗ} \approx \Delta f_{сП}$, но при этом $\Delta f_{ЛЧМ} \approx \approx 2\Delta f_{сП}$.

$$= U_г K_0/(2\pi) \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left[\int\limits_{-\infty}^{\infty} \exp[-ja(\omega-\omega_н)^2 + j\omega(t-\tau_0-\lambda) + j\tau_0\omega_н]\, d\omega \times \right.$$

$$\times U_c(\lambda)\exp[j(\omega_c-\omega_г)\lambda + j\varphi_c - j\lambda^2/(4a)]\, d\lambda.$$

Преобразуем внутренний интеграл подстановкой $\omega = x/\sqrt{a} + [2a\omega_н + (t-\tau_0-\lambda)]/(2a)$; $d\omega = dx/\sqrt{a}$, тогда

$$u_{вых}(t) = U_г K_0/(2\pi\sqrt{a}) \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left| \int\limits_{-\infty}^{\infty} \exp(-jx^2)\, dx \right| \times$$

$$\times U_c(\lambda)\exp[j\omega_н(t-\lambda) + j(t-\tau_0-\lambda)^2/(4a) +$$

$$+ j(\omega_c-\omega_г)\lambda + j\varphi_c - j\lambda^2/(4a)]\, d\lambda.$$

Внутренний интеграл в квадратных скобках сводится к интегралу Френеля и равен $\sqrt{\pi/2}\cdot\exp(-j\pi/4)$ [2]. Тогда

$$u_{вых}(t) = U_г K_0/(2\sqrt{2\pi a})\cdot\exp[j\omega_н t + j(t-\tau_0)^2/(4a) - j\pi/4] \times$$

$$\times \int\limits_0^{T_{ан}} U_c(\lambda)\exp[j(\omega_c-\omega_г)\lambda + j\varphi_c - j\Omega\lambda]\, d\lambda,$$

где $\Omega = \Omega(t) = \omega_н + (t-\tau_0)/(2a)$.

Напряжение на выходе ДЛЗ — это колебание с огибающей, определяемой интегралом $\int\limits_0^{T_{ан}} U_c(\lambda)\exp[j(\omega_c-\omega_г)\lambda + j\varphi_c - j\Omega\lambda]\, d\lambda = S(\Omega)$.

Такой интеграл является преобразованием Фурье радиоимпульса с огибающей $U_c(t)$ и заполнением по частоте $(\omega_c - \omega_г)$, т. е. спектральной функцией $S(\Omega)$ исследуемого участка реализации — радиоимпульса $e(t)$. Текущая частота Ω линейно связана со временем и изменение амплитуды напряжения на выходе ДЛЗ во времени характеризует спектральную функцию напряжения $e(t)$.

1. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1982. 568 с. 2. *Двайт Г. Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы / Под ред. К. А. Семендяева. М.: Наука, 1973. 210 с. 3. *Хорунжий В. А.*, *Долбня Е. В. Богатов П. И.* Акустоэлектроника. Киев: Техніка, 1984. 150 с.

Поступила в редколлегию 11.04.84

УДК 621.3.012.8

В. С. ВУНТЕСМЕРИ, канд. техн. наук

МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ ГЕЛИКОНОВОГО ВЕНТИЛЯ

Геликоновые вентили относятся к классу невзаимных пассивных устройств. Их невзаимные свойства проявляются в изменении передаточной функции при перемене местами подключенных генера-