

# MODULATED SIGNAL PROCESSING IN A DOPPLER DIRECTION FINDER

Sorochan A. G., Petrov D. O.

Donetsk National Technical University

58, Artyom str., Donetsk, 38001, Ukraine; Ph.: (066) 2500760, e-mail: sorochan\_kpm@mail.ru

*Abstract* — The analysis of a Doppler direction finder (DPF) in signal processing with complicated modulation is carried out. The main features of the signal processing in the direction finder are presented, recommendations on operation optimization of the Doppler finder for increasing the s/n ratio are given, a model of DPF in LabVIEW software environment is developed. Assessment of the obtained theoretical studies with study results for a direction finder model.

## ОБРАБОТКА МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В ДОПЛЕРОВСКОМ ПЕЛЕНГАТОРЕ

Сорочан А. Г., Петров Д. А.

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, Донецк, 38001, Украина; тел.: (066) 2500760, e-mail: sorochan\_kpm@mail.ru

*Аннотация* — Проводится анализ доплеровского пеленгатора при обработке сигнала со сложным видом модуляции. Раскрываются основные особенности обработки сигнала в пеленгаторе, даются рекомендации по оптимизации работы пеленгатора с целью обеспечения максимального отношения с/ш. Разработана модель ДП в программной среде LabVIEW. Проводится оценка адекватности полученных теоретических исследований результатам исследований модели пеленгатора.

### I. Введение

Исследования доплеровских пеленгаторов (ДП) проводились при условии приема немодулированного гармонического колебания. Вращение антенны пеленгатора с угловой скоростью  $\Omega$  в постоянном электромагнитном поле формирует на ее выходе фазомодулированный сигнал [3]. Спектр такого колебания содержит спектральные составляющие, кратные частоте вращения антенны. В каждой спектральной составляющей содержится информация об угловом положении источника излучения (ИИ). Для однозначного измерения азимута выделяется первая гармоника частоты вращения антенны, которая сравнивается в фазовом детекторе с опорным колебанием. Такая постановка задач исследования характерна для пеленгационных устройств, используемых в качестве радиомаяков в авиации. Другое направление использования доплеровского пеленгатора связано с радиомониторингом частотного диапазона. В этом случае пеленгатор определяет угловое положение источника излучения [4] со сложным законом модуляции. Прием модулированного сигнала ведет к существенному усложнению спектра сигнала на выходе вращающейся антенны, что может оказать влияние на результат обработки сигнала.

Таким образом, прием ДП модулированного сигнала ведет к особенностям обработки сигналов. Исследование работы пеленгатора в таком режиме позволит выявить эти особенности и определить пути повышения эффективности его работы.

### II. Основная часть

В работе проводится анализ ДП при обработке сигнала модулированного как по амплитуде, так и по частоте. Схема ДП приведена на рис. 1. Сигналы, действующие на выходах антенн Ан.1 и Ан.2, определены в виде

$$u_1(t) = U(t) \cos[w_0 t + m \sin(\Omega_1 t + \gamma) + \varphi_0];$$

$u_2(t) = U(t) \cos[w_0 t + m \sin(\Omega_1 t + \gamma) + \beta \sin(\Omega t - \alpha_0) + \varphi_1]$ , где  $U(t)$  — огибающая сигнала;  $w_0$  — несущая частота;  $m$  и  $\beta$  — индексы модуляции принимаемого сигнала и формируемого за счет вращения антенны;  $\Omega_1$  и  $\Omega$

— частоты модулирующих колебания;  $\gamma$  — начальная фаза модулирующего колебания;  $\alpha_0$  — угловое положение цели;  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  — начальные фазы сигналов.

Сигнал  $u_1(t)$ , прошедший преобразование, смещение по частоте с помощью кварцевого генератора и действующий на первом входе X1

$$u_1'(t) = U_1(t) \cos[(w_c - w_{кр})t + m \sin(\Omega_1 t + \gamma + \theta) + \xi_1 - \varphi_{кр}],$$

где  $\theta$  и  $\xi_1$  — фазы модулирующего и несущего колебаний, вызванные временными задержками.

Сигнал  $u_2'(t)$ , действующий на втором входе X1,

$$u_2'(t) = U_1(t) \cos[w_c t + m \sin(\Omega_1 t + \gamma + \theta') + \beta \sin(\Omega t - \alpha_0) + \xi_2].$$

Сигнал, выделенный фильтром ПФ со средней частотой  $w_{кр}$  и временной задержкой  $T_{пф}$

$$u_3(t) = U_3(t) \cos[w_{кр} t + m_1 \cos[\Omega_1 t + \gamma + 0,5(\theta' + \theta)] + \Omega_1 T_{пф}] + \beta \sin(\Omega t - \alpha_0 + \alpha_1 + \Omega T_{пф}) + \xi_2 - \xi_1 + \varphi_{кр} + w_{кр} T_{пф}].$$

Сигнал является сверткой спектра пеленгуемого сигнала,  $m_1 = 2m \sin[0,5(\theta' - \theta)]$  — вновь сформированный индекс модуляции. Для выделения сигнала, содержащего информацию, сигнал детектируют. Выходной сигнал детектора (X2, ЛЗ3, X2) определен выражением

$$u_4(t) = U_4(t) \cos[m' \sin[\Omega_1 t + \gamma + \theta_1 + 0,5\Omega_1 T_{пф}] - \beta' \cos(\Omega t - \alpha_0 + \theta_1 + 0,5\Omega T_2) - w_{кр} T_2]$$

где  $m' = 2m_1 \sin[0,5\Omega_1 T_2]$  и  $\beta' = 2\beta \sin[0,5\Omega T_2]$  — индексы модуляции;  $T_2$  — временная задержка ЛЗ3.

В сформированном сигнале отсутствуют фазовые составляющие  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , вызванные различного рода временными задержками сигнала в устройстве. Отмечается, что под функцией косинуса содержится два слагаемых. Первое слагаемое получено сверткой спектра принимаемого сигнала  $u_1(t)$ , имеет индекс модуляции  $m'$ . Второе — имеет индекс модуляции  $\beta'$ .

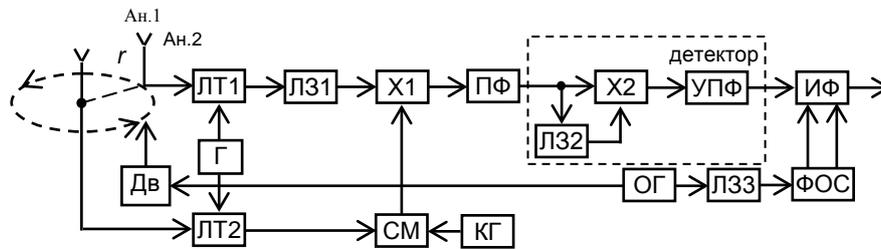


Рис. 1. Структурная схема ДП, где: Дв — двигатель; Ан. — антенна; ЛТ — линейный тракт; Г — гетеродин; КГ и ОГ — кварцевый и опорный генераторы; СМ — смеситель; ЛЗ — линия задержки; ПФ — полосовой фильтр; Х — перемножитель; УПФ — узкополосный полосовой фильтр; ФОС — формирователь ортогональной системы; ИФ — измеритель фазы.

Fig. 1. The block diagram of DPF, where: Дв — motor; Ан. — antenna; ЛТ — line channel; Г — heterodyne; КГ and ОГ — quartz and reference oscillators; СМ — mixer; ЛЗ — delay line; ПФ — band filter; Х — multiplier; УПФ — narrow-band filter; ФОС — orthogonal system shaper; ИФ — phasing tester

Полезной является составляющая с индексом модуляции  $\beta'$ , ее спектральные составляющие содержат информацию об угловом положении ИИ. Анализируется спектральный состав сигнала  $u_3(t)$ . В общем случае спектр сигнала может содержать как четные, так и нечетные гармонические составляющие. Известно, что для однозначного измерения пеленга выделяется первая гармоника частоты модуляции  $\Omega$  [4]. Поэтому для обеспечения максимального уровня полезных (нечетных) спектральных составляющих фаза  $w_{кГ}T_2$  сигнал  $u_3(t)$  должна удовлетворять равенству  $w_{кГ}T_2 = 0,5k\pi$ , где  $k = 1, 3, 5, \dots$ . При этом условии напряжение на выходе Х2 в области низких частот определится

$$u_c(t) = \mp U_4(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta') \cos(\Omega t - \alpha_0 + \theta_1 + 0,5\Omega T_2).$$

Знак плюс соответствует  $k = 3, 7, \dots$

Точность измерений повышается при увеличении отношения сигнал/шум в выходном сигнале. Поэтому фильтром УПФ с временной задержкой  $t_3$  и средней частотой равной  $\Omega$  выделяется первая гармоника сигнала  $u_c(t)$ . Для обеспечения ее максимального уровня индекс модуляции должен быть равен  $\beta' = 2$ . Выходное напряжение

$$u_{c1}(t) = 2U_4(t) J_1(\beta') \cos(\Omega t - \alpha_0 + \mu),$$

где  $\mu = \Omega(0,5T_2 + t_3 + \Delta t' + t_{пф})$  — фаза сигнала.

Определение углового положения ИИ  $\alpha_0$  с использованием фазового детектора не позволяет определить адекватное значение угла положению ИИ из-за изменения уровня принимаемого сигнала, неоднозначности отсчета. Этот недостаток устраняется использованием ортогональной системы сигналов

$$u_{o1}(t) = U_0 \cos(\Omega t + \mu) \text{ и } u_{o2}(t) = U_0 \sin(\Omega t + \mu),$$

формируемую из колебания ОГ. Проекция вектора сигнала  $u_{c1}(t)$  на координатные оси  $u_{o1}(t)$  и  $u_{o2}(t)$ , при условии  $U_0 \gg 2U_4(t)J_1(\beta')$ , определяются равенствами

$$u_x(t) = u_{c1}(t)u_{o1}(t) = U_4(t)J_1(\beta') \cos(\alpha_0);$$

$$u_y(t) = u_{c1}(t)u_{o2}(t) = U_4(t)J_1(\beta') \sin(\alpha_0).$$

Отсюда угловое положение цели определяется отношением измеренных координат  $u_x(t)$  и  $u_y(t)$  как

$$\alpha_0 = \arctg \frac{u_x(t)}{u_y(t)}.$$

Из выражения следует, что значение углового положения цели  $\alpha_0$  не зависит от вида модуляции пеленгуемого ИИ.

На основе приведенной структурной схемы ДП рис. 1 для проверки адекватности аналитических ис-

следований в программной среде LabVIEW разработана модель пеленгатора. Исследовалась обработка частотно модулированных сигналов при модуляции гармоническим колебанием и случайным процессом.

Результаты исследований виртуальной модели ДП представлены в виде временных и спектральных диаграмм, числовых значений в характерных точках схемы. Показано, что перемножением сигналов от неподвижной  $u_1'(t)$  и вращающейся  $u_2'(t)$  антенн производится свертка спектра пеленгуемого источника сигнала, результат свертки зависит от разности временных задержек  $(\theta' - \theta)$  перемножаемых сигналов. Доказано, что при  $\theta' = \theta$  в сигнале  $u_4(t)$  отсутствуют спектральные составляющие пеленгуемого ИИ, сигнал содержит только составляющие спектра кратные частоте вращения антенны. При  $\theta' \neq \theta$  в сигнале  $u_4(t)$  появляются спектральные составляющие пеленгуемого ИИ, что ведет к снижению уровня полезных составляющих, т.е. к понижению выходного отношения сигнал/шум и, как следствие, к снижению точности измерения углового положения. Проведены исследования разработанной модели ДП в программной среде LabVIEW. Полученные результаты адекватны теоретическим исследованиям.

### III. Заключение

1. Раскрываются особенности обработки сигнала в ДП при пеленгации модулированного источника сигнала.
2. Даются рекомендации по оптимизации работы ДП.
3. Разработана модель ДП в программной среде LabVIEW, на ее основе показана адекватность результатов теоретическим исследованиям.
4. Доказано, что наличие разности временных задержек перемножаемых сигналов линейных трактов приводит к снижению выходного отношения сигнал/шум.

### IV. References

- [1] Afanas'ev O.V., Vinogradov A. D., Dmitriev I. S. Vychislitel'nyy algoritm fazovogo pelengatora s kol'cevoj antennoj reshetkoj bez central'nogo antennogo jelementa [Computing algorithm of a phase direction finder with a ring antenna lattice without the central antenna element]. *Antenny*, 2011, Vol. 5 (168), pp. 30–36.
- [2] Sorochan A. G., Dobrjak D. O., Dobrjak O. A. Dvuhkanal'nyj doplerovskij pelengator [Two-channel Doppler direction finder]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2013. No 2/9 (62), pp. 34–38.
- [3] Kukes I. S., Starik M. E. *Osnovy radiopelengacii* [Radio direction finding bases]. Moscow, Sovetskoe radio, 1964. 640p.
- [4] Slobodjanjuka P. V., Blagodar'nyj V. G. *Spravochnik dlja inzhenerov po radiomonitoringu* [The reference book for radio monitoring engineers]. Kiiv, TehnoPoligra, 2012, 720 p.