

В. М. АРТЮШЕНКО, В. И. ВОЛОВАЧ

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Представлен анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта. Показано, что наибольшее влияние на ширину спектра доплеровского сигнала оказывает ускорение движения объекта, при этом чем ускорение больше, тем спектр сигнала шире.

**Ключевые слова:** спектр доплеровского сигнала, протяженный объект, ускорение движения объекта, амплитудный спектр, фазовый спектр.

Известно, что при измерении параметров движения протяженного объекта радиотехническими методами скорость его движения определяется доплеровским смещением частоты сигнала:

$$F_{\text{д}} = \frac{\Omega_{\text{д}}}{2\pi} \approx -f_0 \frac{2V_{\text{р}}}{c} \cos\varphi = \frac{2V_{\text{р}}}{\lambda_0} \cos\varphi,$$

где  $V_{\text{р}}$  — радиальная скорость движения лоцируемого протяженного объекта;  $\lambda_0$  — длина волны зондирующего сигнала;  $\varphi$  — угол между направлением оси главного лепестка диаграммы направленности антенны и направлением движения объекта;  $\Omega_{\text{д}}$  — доплеровское смещение круговой частоты сигнала;  $f_0$  — частота волны зондирующего сигнала;  $c$  — скорость света.

Одной из важнейших статистических характеристик сигнала, отраженного от протяженного объекта и влияющего на точность измерения скорости его движения, является спектр доплеровского сигнала (СДС). Основные параметры СДС — средняя частота  $F_{\text{д.с}}$ , форма огибающей, эффективная ширина  $\Delta F_{\text{сп}}$  и мощность  $P_{\text{д}}$ .

Под средней частотой  $F_{\text{д.с}}$  доплеровского спектра понимается частота, разделяющая СДС на части с одинаковой мощностью  $P_{\text{д}}$ , так что суммарная мощность составляющих СДС, имеющих частоту  $F_{\text{д}} < F_{\text{д.с}}$ , равна суммарной мощности составляющих с частотами  $F_{\text{д}} > F_{\text{д.с}}$  [1—5].

Форма огибающей и эффективная ширина спектра  $\Delta F_{\text{сп}}$  определяются результирующей диаграммой направленности антенны в плоскости угла  $\varphi$ . Величина  $\Delta F_{\text{сп}}$  равна ширине СДС на уровне 0,5 по мощности и зависит как от случайных флуктуаций начальной фазы  $\varphi_{\text{от}}$  сигнала при отражении  $\partial\varphi_{\text{от}}/dt \neq 0$  [6], так и различных доплеровских частот элементарных отражателей в пределах диаграммы направленности конечной ширины. Второй фактор является главенствующим.

Мощность доплеровского спектра оценивается как

$$P_{\text{д}} = P_{\text{ср}} S k S_{\text{эф}} \sin\varphi / 8\pi H^2,$$

где  $P_{\text{ср}}$  — средняя излучаемая мощность;  $S$  — площадь раскрытия антенны;  $k = 0,5 \dots 0,8$  — коэффициент использования антенны;  $S_{\text{эф}}$  — удельная эффективная площадь поверхности рассеяния (ЭПР) антенны, характеризующая отражательные свойства облучаемой поверхности и являющаяся функцией угла  $\varphi$  к оси траектории движения протяженного объекта;  $H$  — расстояние от радиоизмерителя до поверхности облучаемого объекта.

Определим амплитудный и фазовый спектры обрабатываемого сигнала для случая, когда фаза сигнала изменяется по полиномиальному закону [4]:

$$\varphi_d(t) = \Omega_d t + \frac{\dot{\Omega}_d t^2}{2!} + \dots, \quad (1)$$

где  $\dot{\Omega}_d$  — ускорение движения объекта.

Энергетический спектр сигнала (1) может быть описан выражением

$$S(j\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} S_a(t) \exp(-j\omega t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\Omega_d t + \frac{\dot{\Omega}_d t^2}{2!}\right) \exp(-j\omega t) dt, \quad (2)$$

где  $-T/2 < t < T/2$ ,  $S_a(t)$  — амплитуда сигнала.

Представим выражение (2) в следующем виде [1]:

$$S(j\omega) = 0,5 \sqrt{\frac{\pi}{\dot{\Omega}_d}} \cdot \exp\left[-j \frac{(\omega - \Omega_d^2)^2}{2\dot{\Omega}_d}\right] \int_{-X_1}^{X_2} \exp\left(-j \frac{\pi x^2}{2}\right) dx, \quad (3)$$

где

$$X_1 = \left[ \frac{\dot{\Omega}_d T}{2} + (\omega - \Omega_d) \right] / (\pi \dot{\Omega}_d), \quad X_2 = \left[ \frac{\dot{\Omega}_d T}{2} - (\omega - \Omega_d) \right] / (\pi \dot{\Omega}_d).$$

Выражение (3), в свою очередь, можно преобразовать к виду

$$S(j\omega) = 0,5 \sqrt{\frac{\pi}{\dot{\Omega}_d}} \cdot \exp\left[-j \frac{(\omega - \Omega_d^2)^2}{2\dot{\Omega}_d}\right] \{c(X_1) + js(X_1) + c(X_2) + js(X_2)\}, \quad (4)$$

где  $c(X) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi y^2}{2}\right) dy$  и  $s(X) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi y^2}{2}\right) dy$  — интегралы Френеля.

Известно, что  $c(-X) = -c(X)$  и  $s(-X) = -s(X)$ . Тогда из уравнения (4) могут быть найдены выражения для амплитудного спектра

$$|S(\omega)| = 0,5 \sqrt{\frac{\pi}{\dot{\Omega}_d}} \cdot \left\{ [c(X_1) + c(X_2)]^2 + [s(X_1) + s(X_2)]^2 \right\}^{0,5} \quad (5)$$

и фазового спектра

$$F(\omega) = \frac{(\omega - \Omega_d)^2}{2\dot{\Omega}_d} - \operatorname{arctg} \left[ \frac{s(X_1) + s(X_2)}{c(X_1) + c(X_2)} \right]. \quad (6)$$

На рис. 1, а, б соответственно представлены графики амплитудного  $S(f)$  и фазового  $F(f)$  спектров, построенные на основе выражений (5) и (6) для некоторых значений  $\dot{\Omega}_d$  при  $T = 0,5$  с;  $f = \omega/2\pi$ .

Следует отметить, что амплитудный спектр сигнала осциллирует относительно некоторого постоянного значения. Число периодов и амплитуда осцилляций зависят от произведения  $\dot{\Omega}_d T$ . Для описания осцилляций амплитуды может быть использована косинусная модель спектральной пульсирующей структуры. В зависимости от частоты осцилляции амплитуда

может быть представлена в виде отрезка синусоиды, модулированной медленно изменяющейся функцией  $\cos x$  (рис. 2).

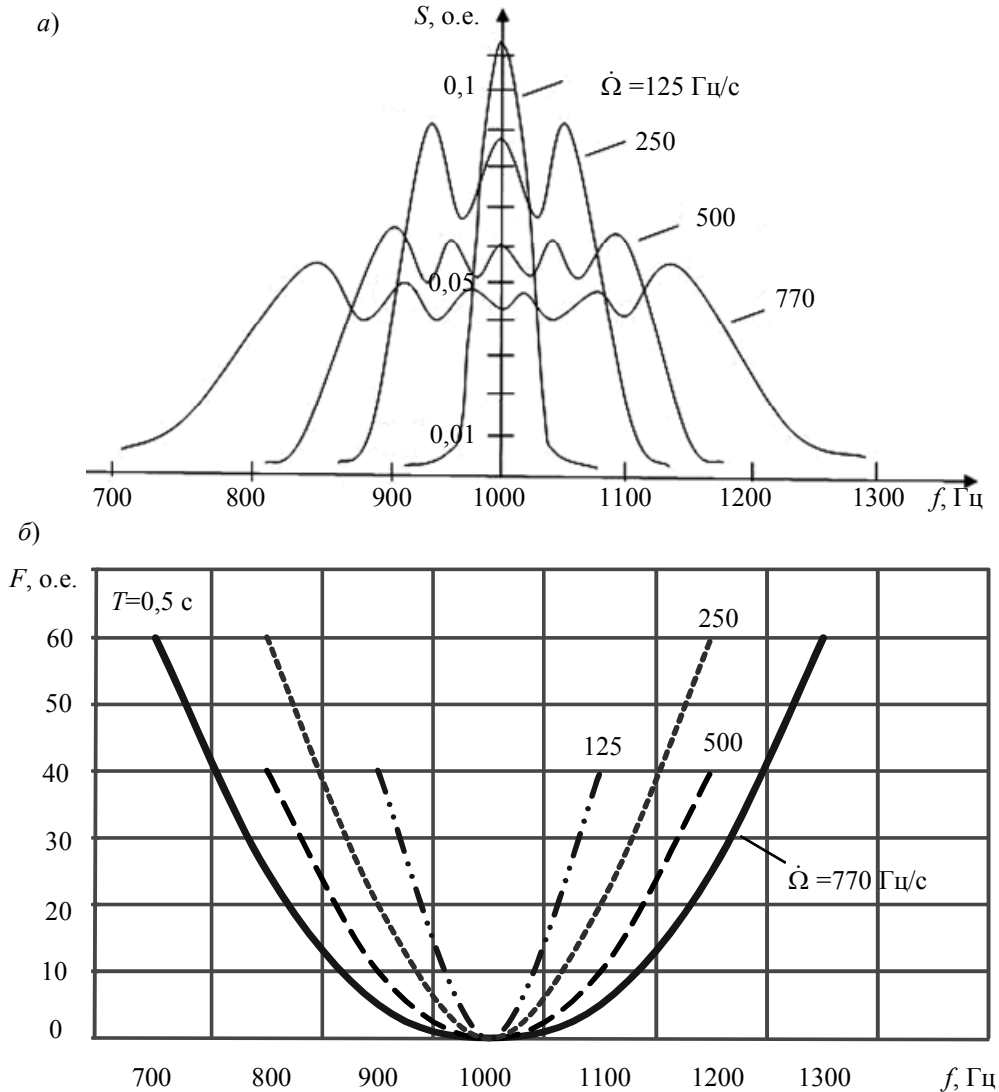


Рис. 1

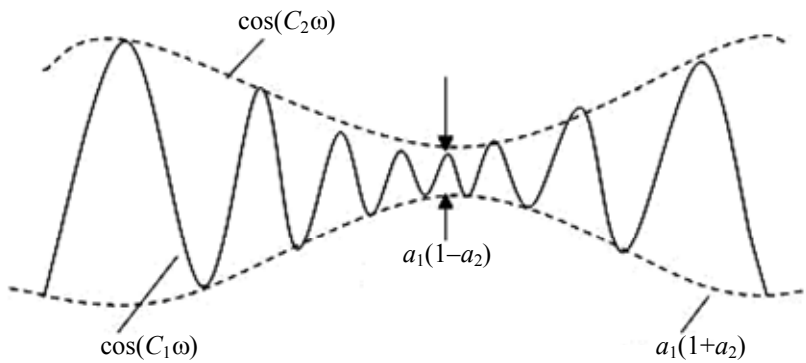


Рис. 2

Использование такой модели позволяет рассматривать спектр как гладкий с флуктуирующей погрешностью, так что

$$|S(\omega)| = \left[ (1 + a_1 \cos(C_1\omega))(1 + a_2 \cos(C_2\omega)) \right]; \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2,$$

где  $a_1, a_2$  — коэффициенты, которые могут быть положительными или отрицательными в зависимости от интегралов Френеля, подлежащих аппроксимации;  $C_1$  и  $C_2$  — аппроксимационные постоянные.

Как видно из представленных графиков, при сравнительно большом времени обработки сигнала влияние параметра  $\dot{\Omega}_d$  на ширину спектра является преобладающим, и спектр в этом случае имеет трапецеидальную форму с осциллирующей амплитудой. С уменьшением времени обработки сигнала ширина спектра, как показывает анализ, стремится к нулю, причем амплитудные пульсации вершины спектра уменьшаются, а его форма принимает колоколообразный вид. В этом случае вершина кривой зависимости  $S(f)$  становится плоской, а ее края принимают пологий вид.

Экспериментальные исследования параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от протяженного объекта, проводились на действующих сортировочных горках. В качестве протяженных объектов использовались железнодорожные одиночные вагоны (отцепы); радиолокационным измерителем скорости служил серийный измеритель РИС-В2, работающий в СВЧ-диапазоне с длиной волны 8 мм. Анализ и обобщение результатов исследования параметров спектра производились по многочисленным фрагментам доплеровского сигнала, отраженного от движущихся с различным ускорением объектов (вагонов одной модели). Число рассматриваемых фрагментов для каждой модели составляло 380...400. Наиболее характерные спектры принимаемых доплеровских сигналов, полученные экспериментально, представлены на рис. 3.

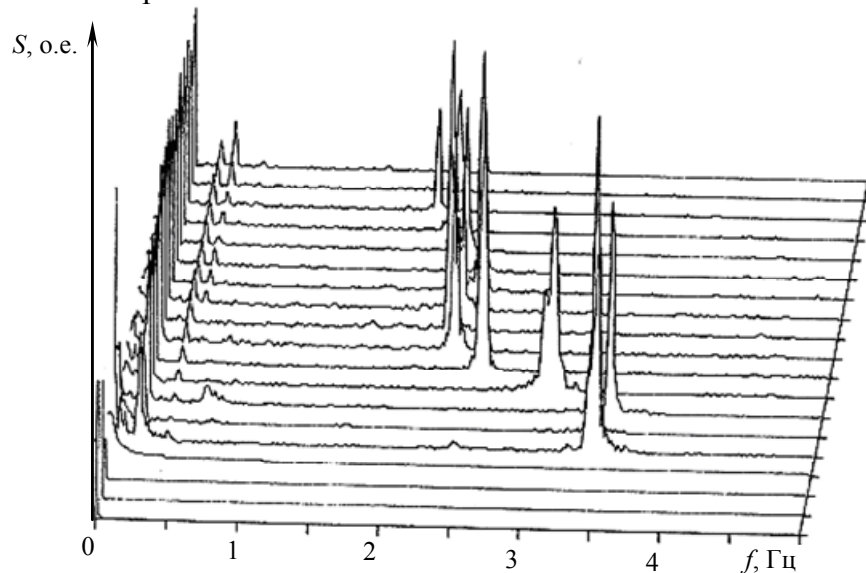


Рис. 3

В результате исследований установлено, что все спектры отраженных сигналов можно условно разделить на три группы. К первой группе относятся спектры доплеровских сигналов при облучении объектов под углом  $\alpha \approx 0$ , когда протяженный объект находится на расстоянии порядка 50...60 м от измерителя. Для этого случая характерен спектр отраженного сигнала, потенциально обеспечивающий хорошую точность измерения скорости и высокую разрешающую способность. Ширина спектра на уровне 0,707 при этом равна  $\Delta F_{сп} = 8...10$  Гц.

Ко второй группе относятся спектры сигналов, отраженных от объектов, облучаемых под углом  $\alpha_0 \geq 17^\circ$ . В этом случае ширина спектра значительно увеличивается и составляет  $\Delta F_{сп} = 20...25$  Гц, что соответствует расстоянию от объекта до измерителя скорости порядка 10...20 м. Угловые размеры объекта, зачастую превышающие ширину луча антенны, при движении объекта быстро меняются, что сопровождается флуктуациями отражающих центров, приводящими к расширению спектров доплеровских сигналов, ухудшению потенциальной точности измерителя скорости и разрешения по частоте. Кроме того, для этого случая характерно резкое уменьшение ЭПР некоторых типов вагонов, вызванное наклонным падением луча на гладкую поверхность вагона (зеркальным отражением), а также некоторое

уменьшение разброса величины ЭПР, обусловленное тем, что узкий луч антенны облучает лишь часть поверхности (прожекторный режим).

Третья группа спектров соответствует режиму замедления движения объектов от момента срабатывания до момента выключения вагонных замедлителей. В этом случае спектр отраженного сигнала расширяется, так что его ширина достигает  $\Delta F_{\text{сп}} = 30 \dots 40$  Гц. Точность измерения скорости при этом самая наихудшая.

Исследования показали, что при малых скоростях скатывания вагонов спектр отраженного сигнала подвержен более сильным „паразитным“ воздействиям, чем спектр сигнала, отраженного от объекта, движущегося с более высокой скоростью. Это объясняется тем, что при малых скоростях скатывания вагонов спектр отраженного сигнала попадает в частотную область аддитивной помехи, спектр которой „накладывается“ на спектр доплеровского сигнала. В результате может происходить не только расширение спектра, но и его „расщепление“, что значительно снижает вероятность точного измерения частоты доплеровского сигнала.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено, что наибольшее влияние на ширину спектра доплеровского сигнала (а значит, и на точность измерения скорости движения) оказывает ускорение движения протяженного объекта. При этом чем оно больше по абсолютной величине, тем шире энергетический спектр отраженного сигнала, что полностью совпадает с результатами теоретических исследований.

Статья подготовлена по результатам исследований, проведенных в ходе выполнения в 2012 г. фундаментальной НИР в рамках государственного задания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / Пер. с англ.; Под ред. В. С. Кельзона. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
2. Колчинский В. Е., Мандуровский И. А., Константиновский М. И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / Под ред. В. Е. Колчинского. М.: Сов. радио, 1975. 432 с.
3. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В. Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1973. 608 с.
4. Тузов Г. И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах. М.: Сов. радио, 1967. 256 с.
5. Дудко Г. К., Резников Г. Б. Доплеровские измерители скорости и угла сноса самолета. М.: Сов. радио, 1964. 344 с.
6. Флеров А. Г., Тимофеев В. Т. Доплеровские устройства и системы навигации. М.: Транспорт, 1987. 191 с.

#### *Сведения об авторах*

- Владимир Михайлович Артюшенко** — д-р техн. наук, профессор; Финансово-технологическая академия, кафедра информационных технологий и управляющих систем, г. Королев; E-mail: artuschenko@mail.ru
- Владимир Иванович Воловач** — канд. техн. наук, доцент; Поволжский государственный университет сервиса, кафедра информационного и электронного сервиса, Тольятти; E-mail: ssunrise@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
информационного и электронного  
сервиса Поволжского государственного  
университета сервиса

Поступила в редакцию  
08.06.12 г.