

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

В. М. Артющенко¹, В. И. Воловач²

¹ ГБОУ ВПО МО «Финансово-технологическая академия», г. Королев

² ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти

Статья получена 12 января 2015 г.

Аннотация. Показано, что при анализе и практической реализации радиотехнических устройств ближнего действия следует учитывать протяженный характер обнаруживаемого объекта, многолучевой характер отражения сигналов от объекта и т. п. Практический интерес вызывает анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта, поскольку именно он позволяет с большой достоверностью определять параметры движения, в частности скорость и ускорение протяженного объекта. Доказано, что на ширину спектра доплеровского сигнала и, следовательно, на точность измерения скорости движения протяженного объекта наибольшее влияние оказывает его ускорение движения. При этом наблюдается прямая зависимость: чем ускорение больше, тем спектр сигнала шире. Обсуждены результаты экспериментальных исследований параметров спектра доплеровского сигнала для различных моделей протяженных объектов. Анализ и обобщение полученных результатов проводился по значительной выборке фрагментов спектра доплеровского сигнала, что позволяет рассматривать эти результаты как статистически достоверные.

Ключевые слова: спектр доплеровского сигнала, протяженный объект, радиотехнический измеритель, скорость движения, ускорение движения, эффективная поверхность рассеивания, амплитудный спектр, фазовый спектр.

Abstract. It is shown that in the analysis and implementation of short-range radio devices an extended nature of the sensing object and the nature of the multipath signal reflections from the object should be considered. The analysis of the parameters of the spectrum of Doppler signal reflected from the moving extended object is of practical interest, since it allows to determine the parameters of motion with great certainty, in particular the speed and acceleration of an extended object. It is proved that the width of the Doppler signal spectrum and, hence, the accuracy of speed measuring of an extended object are the most influenced by its acceleration. In this case there is a direct relation: the greater the acceleration, the wider the signal spectrum. The results of experimental study of spectrum parameters of the Doppler signal for different models of extended objects are discussed. Analysis and generalization of the results was carried out on a large sample of fragments of the spectrum of the Doppler signal, which allows us to consider these results as statistically significant.

Key words: spectrum of the Doppler signal, extended object, radio meter, speed, acceleration of the motion, the effective surface scattering, the amplitude spectrum, phase spectrum.

Введение

Радиотехнические устройства ближнего действия (РУБД) нашли широкое применение в различных технических системах, служащих для обнаружения объектов, измерения их параметров движения, например, таких как скорость и ускорение [1, 2], позиционирования объектов в пространстве, системах классификации и идентификации и т. п. РУБД в своей работе реализуют классические радиолокационные принципы. Вместе с тем при практической реализации устройств РУБД, в отличие от радиотехнических систем дальнего действия, необходимо учитывать целый ряд специфических особенностей. Например, протяженный характер лоцируемого объекта, сравнимость его

геометрических размеров с удаленностью от радиолокационного измерителя (РИ), многолучевой характер отражения зондирующего сигнала и т. п. [3].

В результате, становится необходимым не только проведение анализа особенностей отражения зондирующего сигнала, определения ширины спектра доплеровского сигнала (СДС), выбора метода определения и экспериментального нахождения эффективной поверхности (площади) рассеяния, но и создание на их основе математических моделей адекватных реальным физическим явлениям.

Априорное знание статистических характеристик сигналов и возмущающих воздействий позволяет сформулировать более точные математические модели, как отраженного сигнала, так и действующих на этот сигнал помех, а также обоснованно подойти к разработке устройств РУБД. Ранее авторами [4, 5] был осуществлен выбор и обоснованы модели возмущающих воздействий на РУБД с учетом многолучевого характера сигналов, отраженных от протяженных объектов. В частности, было отмечено, что плотность распределения вероятности (ПРВ) огибающей такого сигнала хорошо аппроксимируется ПРВ Накагами.

Рассмотрим и проанализируем радиолокационные измерители параметров движения протяженных объектов (ПДПО), относящиеся к классу РУБД, а также в более широком смысле к системам ближней радиолокации (СБР).

Измерения параметров движения протяженных объектов проводились на примере объектов железнодорожного и автомобильного транспорта, которые по своей структуре можно отнести к протяженным объектам сложной формы.

В работах [6, 7], было показано, что транспортное средство (ТС) как объект локации представляет собой сложную пространственно-распределенную радиолокационную цель. Характеристики сигнала, отраженного от такой цели, влияют не только на дальность действия РИ, но и во многом определяют ряд других важных показателей качества работы таких систем: точность измерения, разрешающую способность и др.

1. Анализ параметров спектра доплеровского сигнала

Известно [1, 8], что при измерении параметров движения какого-либо протяженного объекта радиолокационными методами скорость его движения определяется доплеровским смещением частоты (ДСЧ) 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; λ_0 – длина волны зондирующего сигнала; φ – угол между направлением оси главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны и направлением движения протяженного объекта.

Одной из важнейших статистических характеристик сигнала, отраженного от протяженного объекта и влияющего на точность измерения скорости его движения, является СДС. Основными параметрами СДС являются средняя частота спектра $F_{\text{д.с}}$, форма огибающей, эффективная ширина ΔF и мощность $P_{\text{д}}$ [9].

Под средней частотой $F_{\text{д.с}}$ доплеровского спектра понимается частота, делящая мощность СДС $P_{\text{д}}$ пополам, так, что суммарная мощность составляющих СДС, имеющих частоту $F_{\text{д}} < F_{\text{д.с}}$, равна суммарной мощности составляющих с частотами $F_{\text{д}} > F_{\text{д.с}}$ [10].

Эффективная ширина СДС равна его ширине на уровне 0,5 по мощности и зависит как от случайных флуктуаций начальной фазы $\varphi_{\text{от}}$ при отражении $\partial\varphi_{\text{от}}/dt \neq 0$ [11], так и различия доплеровских частот элементарных отражателей в пределах ДН антенны конечной ширины. Второй фактор является главенствующим.

Можно говорить, что форма огибающей и эффективная ширина СДС ΔF определяется результирующей ДН антенны в плоскости угла φ [7].

Кроме того, на эффективную ширину СДС ΔF оказывает интервал корреляции τ_k , характеризующий скорость изменения случайного процесса во времени [7]:

$$\Delta F = 1/\tau_k ,$$

Ширину СДС принимаемого сигнала можно оценить по формуле

$$\Delta F = F_d \cos 2\Delta\alpha ,$$

где $2\Delta\alpha$ – угловой размер ТС (в горизонтальной плоскости).

Мощность СДС можно определить исходя из выражения:

$$P_d = P_{cp} S_{\Delta} k \sigma_{по} \sin \varphi / 8\pi H^2 ,$$

где P_{cp} – средняя излучаемая мощность; S_{Δ} – площадь раскрыва антенны; $k = 0,5 \dots 0,8$ – коэффициент использования антенны; $\sigma_{по}$ – удельная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) протяженного объекта, характеризующая отражательные свойства облучаемой поверхности и являющаяся функцией угла к оси траектории движения протяженного объекта φ ; H – расстояние (перпендикуляр) от РИ до поверхности облучаемого объекта.

Определим амплитудный и фазовый спектр обрабатываемого сигнала для случая, когда фаза доплеровского сигнала изменяется по полиномиальному закону [9]

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

где первое слагаемое Ω_d – характеризует скорость движения объекта, второе $\dot{\Omega}_d$ – его ускорение.

Энергетический спектр сигнала (1) может быть описан выражением [1]:

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

где $-T/2 < t < T/2$.

Воспользовавшись [12] представим выражение (2) в виде

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

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

В свою очередь, выражение (3) можно представить в виде:

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

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 выражения (4) могут быть найдены амплитудный спектр

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

и фазовый спектр

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

На рис. 1 и 2 представлены амплитудные $S(f)$ и фазовые $F(f)$ спектры, вычисленные на основании выражений (5) и (6) и построенные для некоторых значений $\dot{\Omega}_d$, характеризующих величину ускорения объекта при различных интервалах времени T ; $f = \omega/2\pi$.

Следует отметить, что амплитудный спектр сигнала осциллирует относительно некоторого постоянного значения. Число периодов и амплитуда осцилляций зависит от произведения $\dot{\Omega}_d T$.

Для описания осцилляций амплитуды может быть использована косинусная модель спектральной пульсирующей структуры. В зависимости от частоты

осцилляции амплитуда представлена на рис. 3 в виде отрезка синусоиды, модулированной медленно изменяющейся косинусоидальной функцией.

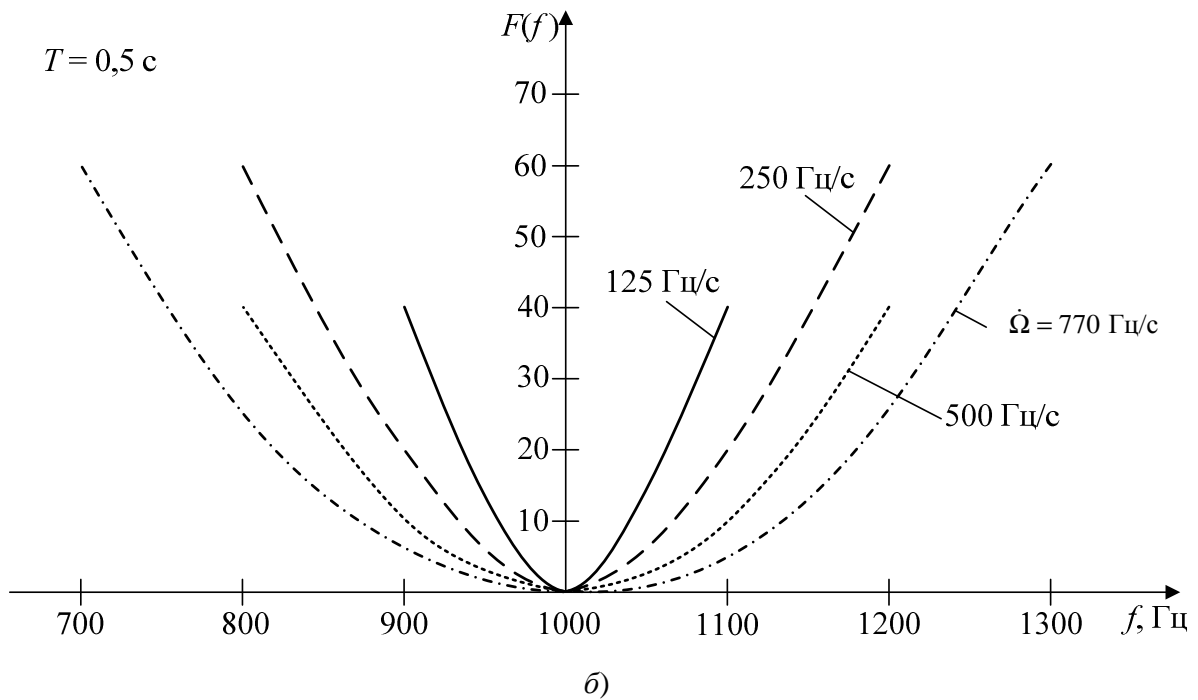
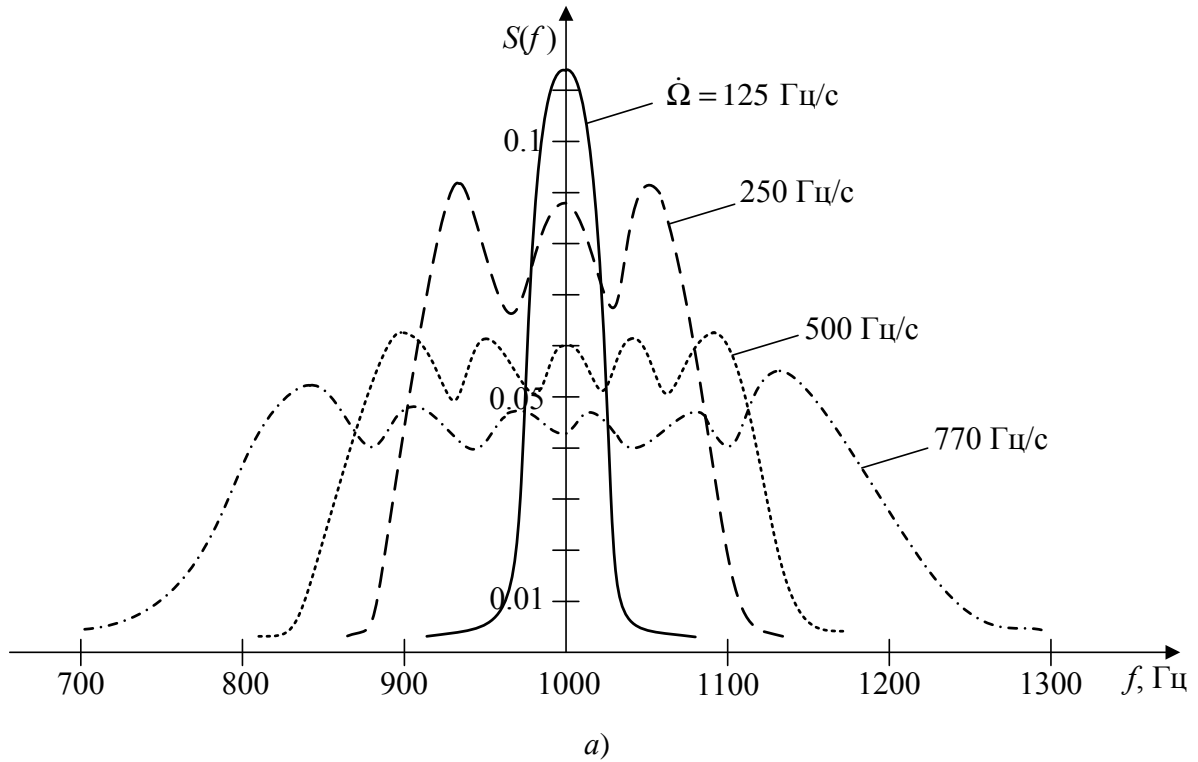
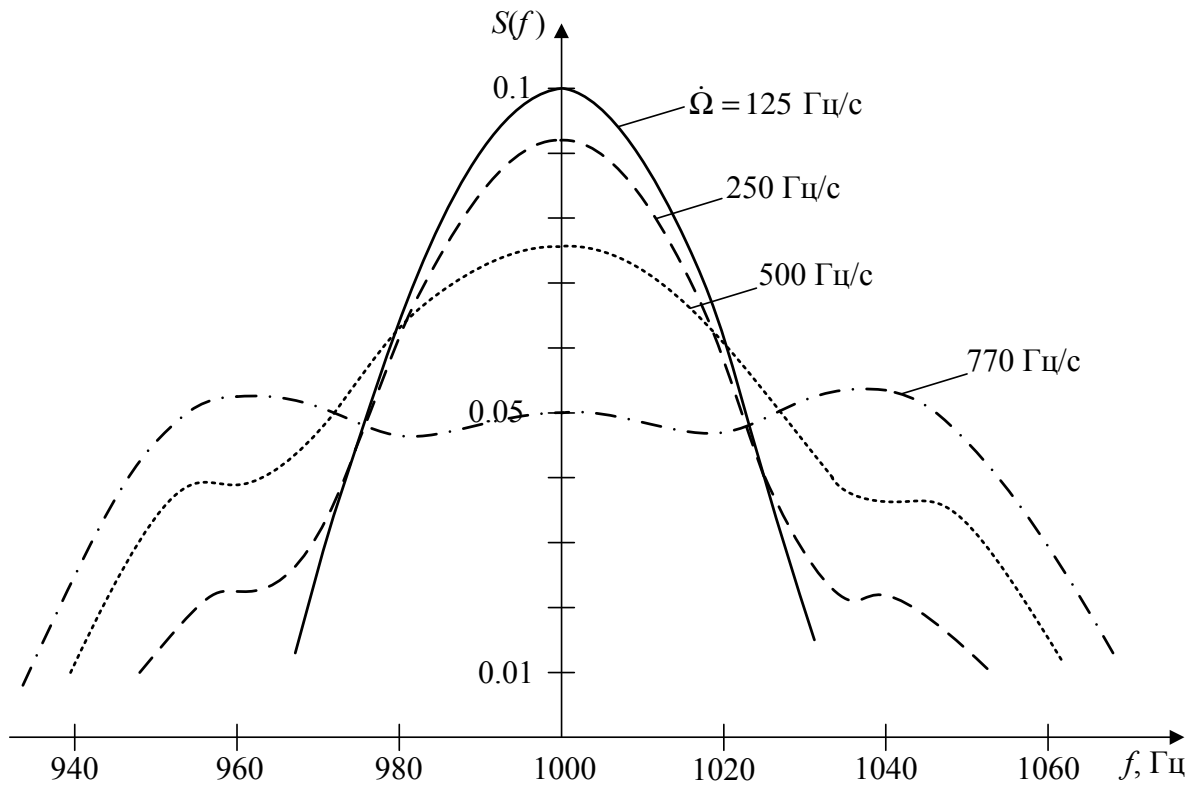
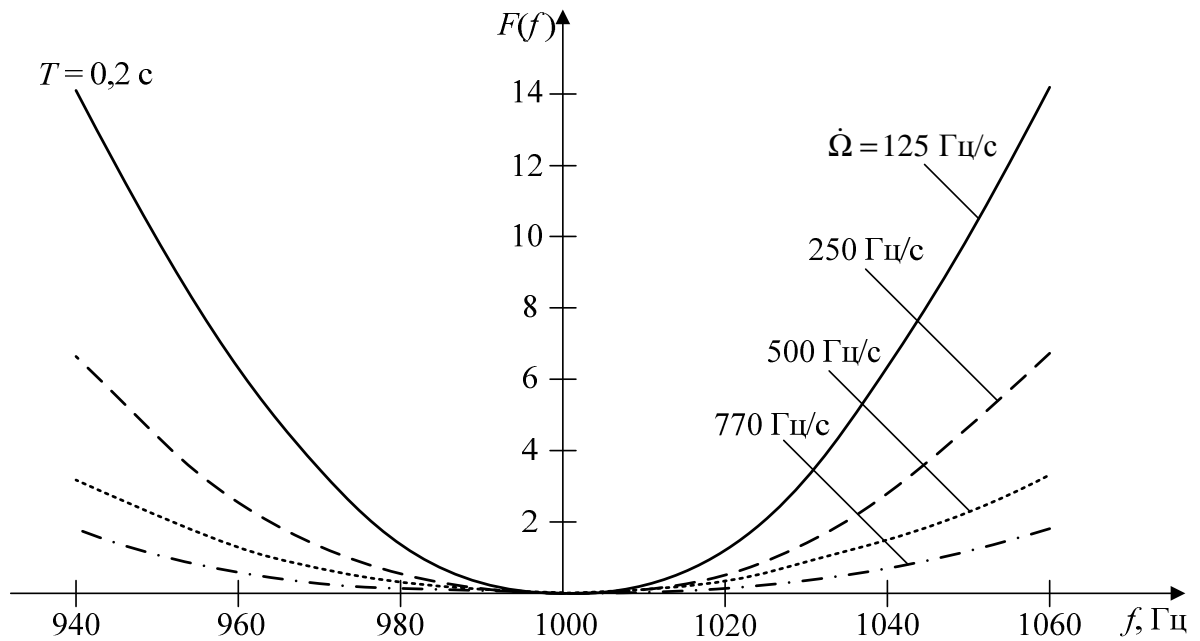


Рис. 1. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектр доплеровского сигнала при $T = 0,5$ с



а)



б)

Рис. 2. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектр доплеровского сигнала при $T = 0,2$ с

Использование такой модели в виде модулированного функцией $\cos x$ отрезка синусоиды, позволяет рассматривать спектр как гладкий, с флуктуирующей погрешностью, так, что

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

где a_1 и a_2 – коэффициенты, которые могут быть положительными или отрицательными числами в зависимости от конкретной природы интегралов Френеля, подлежащих аппроксимации.

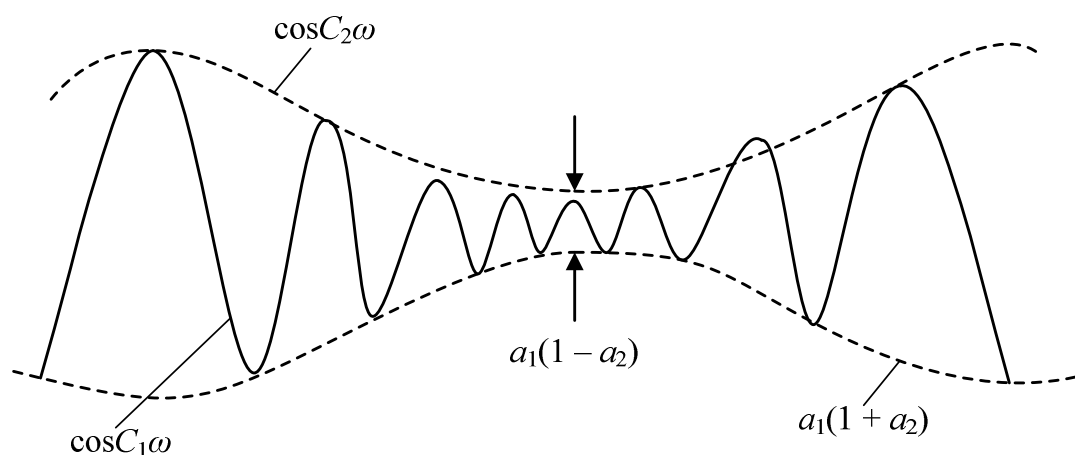


Рис. 3. Аппроксимация вершины амплитудного спектра

Как видно из представленных на рис. 1 и 2 графиков на ширину спектра оказывают влияние два параметра $\dot{\Omega}_d$ и T . При сравнительно большом времени обработки влияние параметра $\dot{\Omega}_d$ на ширину спектра является преобладающим [13], который в этом случае имеет трапецеидальную форму с осциллирующей амплитудой.

С уменьшением T расширение спектра, вызываемое величиной $\dot{\Omega}_d$, стремится к нулю, причем амплитудные пульсации вершины СДС уменьшаются, а его форма принимает колоколообразный вид. В этом случае уменьшение величины T ведет к расширению спектра и уменьшению его амплитуды, при этом

вершина кривой зависимости $S(f)$ становится плоской, а ее края принимают пологий вид.

2. Экспериментальное исследование спектра доплеровского сигнала

Методика исследований параметров СДС была предложена авторами в работах [1, 3], где впервые были экспериментально определены средние значения ЭПР протяженного объекта $\sigma_{\text{по}}$, ширины СДС ΔF и среднеквадратического отклонения ЭПР σ для различных типов автомобилей.

В ходе проведенных исследований [3, 7] было показано, что ЭПР различных ТС (автомобилей) может изменяться в сотни раз при небольших изменениях курсового угла ТС относительно РУБД. Ширина энергетического СДС, отраженного от ТС, в значительной степени определяется взаимным расположением ТС и РУБД. Она минимальна, если курсовой угол мал ($\Delta F = 10...15$ Гц). При увеличении курсового угла до $17...20^\circ$ и уменьшении расстояния между ТС и РУБД до $3...50$ м ширина спектра сигнала увеличивается в $3...4$ раза.

Кроме того, было показано, что в доплеровском спектре сигналов, отраженных от некоторых типов ТС, наблюдаются гармонические составляющие, частоты которых значительно отличаются от основной частоты сигнала.

Дальнейший интерес с целью обобщения полученных результатов представляло проведение исследований для более протяженных объектов, а также исследование влияния на параметры СДС меняющегося ускорения этих объектов.

В экспериментах по исследованию параметров СДС в качестве протяженных объектов использовались железнодорожные отцепы (одиночные вагоны). В качестве РИ скорости использовался серийный радиолокационный измеритель скорости РИС-В2 с длиной волны $\lambda = 8$ мм. Анализ и обобщение полученных результатов исследования параметров СДС производились по многочисленным фрагментам доплеровского сигнала, отраженных от движущихся с различным ускорением вагонов одной модели. Число рассматриваемых фрагментов от

вагонов каждого типа составляло от 400 до 800. Эксперименты проводились на трех измерительных участках сортировочной горки.

На рис. 4 представлены наиболее характерные спектры принимаемых доплеровских сигналов, полученные экспериментально.

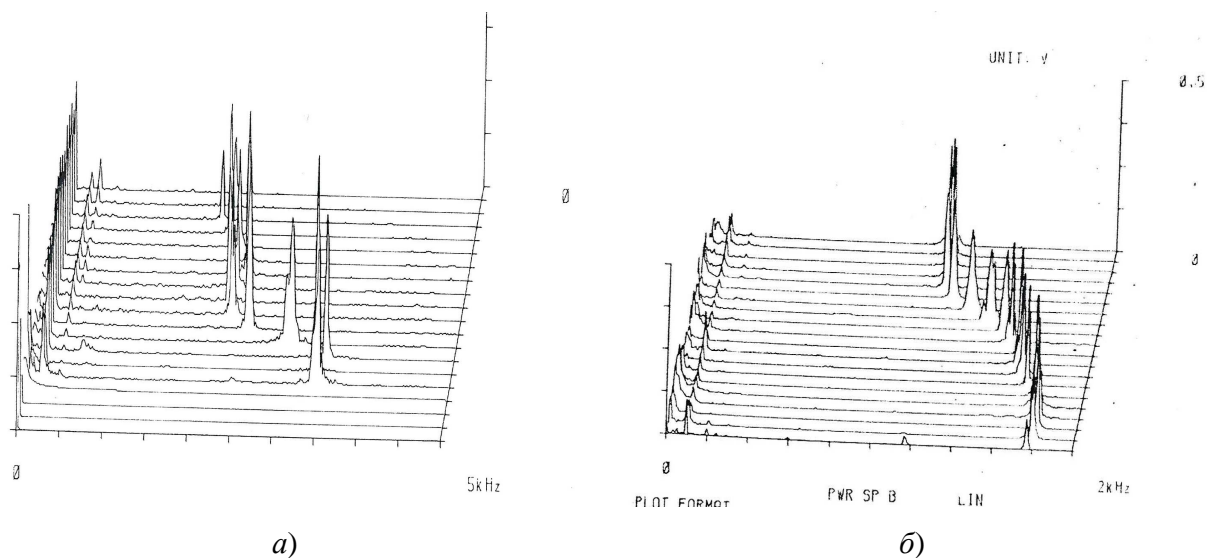


Рис. 4. Изменение во времени СДС, отраженного от: *а* – полувагона модель 12-726; *б* – крытого вагона модель 11-277

Все спектры отраженных сигналов можно разделить на три группы [12].

К первой группе (участок №1) относятся СДС при облучении ТС (отцепов) под курсовым углом близким к нулю, когда ТС находится на относительно большом расстоянии около 50...60 м. В этом случае анализу подвергался спектр сигнала, отраженного от торцевой части отцепа. Ширина спектра на уровне 0,707 при этом составляла $\Delta F = 8...10$ Гц, что обеспечивало не только хорошую точность измерения скорости и ускорения ТС, но и высокую разрешающую способность.

Вторая группа спектров (участок №2) соответствовала положительным курсовым углам облучения ТС $\alpha_0 \geq 17^\circ$. В этом случае ширина СДС значительно увеличивалась и составляла $\Delta F = 20...25$ Гц. При этом ТС находилось на

относительно малых расстояниях от РИ, около 10...20 м. В этом случае анализу подвергался спектр сигнала, отраженного от боковой поверхности отцепа.

Следует отметить, что угловые размеры ТС зачастую превышают ширину ДН антенны РИ. При движении ТС быстро меняется его ракурс, что сопровождается быстрыми флуктуациями отражающих центров. Это, в свою очередь, приводит к расширению спектров доплеровских сигналов, ухудшению потенциальной точности измерителя скорости и разрешению его по частоте. Кроме того, для этого случая характерно резкое уменьшение ЭПР некоторых типов вагонов (цистерн), вызванное наклонным падением луча на гладкую поверхность ТС (зеркальным отражением), а также некоторое уменьшение разброса величины ЭПР различных типов вагонов, обусловленное тем, что узкий луч антенны РИ облучает лишь часть поверхности (прожекторный режим) [3].

Третья группа спектров (участок №3) соответствовала режиму замедления отцепов в зоне торможения от момента срабатывания до момента отпускания вагонных замедлителей. При этом сильной вибрации был подвержен как корпус самого отцепа, так и радиолокационный измеритель. В этих случаях спектр отраженного сигнала расширялся так, что его ширина достигает $\Delta F = 30...40$ Гц (см. рис. 4, а). Точность измерения скорости при этом была самая наихудшая.

Значительное расширение спектра наблюдалось и у доплеровских сигналов, отраженных от маневровых локомотивов, корпус которых непрерывно вибрировал от работающего двигателя. Причем СДС не только расширялся, но и имел «паразитные» гармонические составляющие, амплитуда которых была соизмерима со спектром основного сигнала, что существенно влияло на точность измерения, и приводило к значительным погрешностям измерения скорости.

Значения ширины СДС на уровне 0.707, отраженных от различных моделей железнодорожных вагонов, приведены в табл. 1 [14], где $\delta_{д.с} = \Delta F / F_{д.с}$ – относительная погрешность измерения доплеровского сигнала.

Таблица 1. Ширина спектров доплеровских сигналов, отраженных от различных моделей железнодорожных вагонов

Модель вагона	Ширина спектра доплеровского сигнала ΔF , Гц (по уровню 0.707)					
	Участок №1		Участок №2		Участок №3	
	ΔF , Гц	$\delta_{д.с.}$, %	ΔF , Гц	$\delta_{д.с.}$, %	ΔF , Гц	$\delta_{д.с.}$, %
11-066	8	1.0	25	1.8	38	3.5
11-277	12	1.0	26	1.8	36	3.5
12-726	12	1.0	25	1.8	38	3.5
12-515	12	1.25	23	1.6	34	2.8
15-1474	10	1.25	25	1.8	39	3.5
15-1443	8	1.0	23	1.6	38	2.8
11-715	12	1.25	26	1.8	36	3.5
11-739	10	1.25	25	1.8	38	3.5
13-470	12	1.25	23	1.6	39	3.5
13-479	10	1.25	23	1.6	38	3.5
13-401	12	1.25	23	1.6	39	3.5
Рефрижератор	10	1.25	25	1.6	40	3.64
Маневровый локомотив	12	1.5	26	1.6	42	3.9

Следует отметить, что каждая часть таблицы отражает усредненную по множеству реализаций спектра отраженного от отцепа доплеровского сигнала, движущегося в зоне действия РИ.

Результаты экспериментальной обработки показали, что при облучении вращающихся колес вагона или его колеблющихся частей (например, боковых дверей), в спектре отраженных сигналов появляются дополнительные составляющие. Причем, частоты этих составляющих могут быть как выше, так и ниже частоты основного сигнала, а их уровень на 10...40 дБ ниже уровня основного сигнала.

Исследования показали, что при малых скоростях скатывания отцепов СДС подвержен более сильным «паразитным» воздействиям, чем спектр сигнала, отраженного от отцепа с более высокой скоростью. Это объясняется тем, что при малых скоростях скатывания отцепов спектр отраженного сигнала попадает в частотную область аддитивной помехи, спектр которой «накладывается» на

спектр доплеровского сигнала. В результате может происходить не только расширение ΔF , но и его «расщепление», что значительно снижает вероятность точного измерения ДСЧ.

Следует отметить, что при технической реализации радиолокационного измерителя для повышения точности измерения средней частоты спектра отраженного сигнала постоянная времени измерения должна выбираться из условия минимальной ширины доплеровского отраженного сигнала при максимально возможной величине ускорения движения отцепа с учетом необходимого быстродействия измерителя в получении и выдаче информации о скорости движения отцепа. Как видно из представленных результатов [14], постоянная времени измерения должна лежать в пределах 80...120 мс.

3. Выводы

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

Работа выполнена в рамках фундаментальной НИР, финансируемой из средств Минобрнауки РФ (Государственное задание на 2014 г., код 226).

Литература

1. Артюшенко В.М. Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов. М.: ГБОУ ВПО ФТА, 2013. 214 с.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Пороговый способ измерения скорости протяженных объектов в зоне контроля радиотехнических устройств

- обнаружения ближней дальности // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014, № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/28/text.pdf>
3. Воловач В.И. Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств ближнего действия. М.: Радио и связь, 2013. 228 с.
 4. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. Kharkov: KNURE, 2013. P. 137-140.
 5. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Иванов В.В. Статистические характеристики сигналов и помех в радиотехнических устройствах ближнего действия // Известия вузов. Приборостроение. 2014, т. 57, № 7. С. 46-50.
 6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей полезных сигналов и информационных процессов радиолокационных устройств ближнего радиуса действия // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014, № 5. С. 14-20.
 7. Воловач В.И. К вопросу определения статистических характеристик сигналов, отраженных от протяженных объектов // XIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь». Сборник докладов конференции. Том III. Воронеж: 2007. С. 1873-1881.
 8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Определение параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося объекта // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 24-26 ноября 2014 г., Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Москва, 2014. С. 325-329.
 9. Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах. М.: Сов. радио, 1967. 256 с.
 10. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд. переб. и доп. М. : Сов. радио, 1973. 608 с.

11. Флеров А.Г., Тимофеев В.Т. Доплеровские устройства и системы навигации. М.: Транспорт, 1987. 191 с.
12. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / Пер. с англ.; под ред. В.С. Кельзона. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
13. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ параметров спектра сигнала, отраженного от протяженного объекта // Приборостроение. 2012, т. 55, № 9. С. 62-67.
14. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Экспериментальное исследование параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от протяженного объекта // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012, № 3 (19). С. 17-24.