

УДК 621.396.96

Л.М. Краснов, канд. техн. наук

*Севастопольский военно-морской институт,
ул. Дыбенко 1а, г. Севастополь, Украина, 99035
rt.sevgtu @ stel.Sebastopol. ua*

АНАЛИЗ СПЕКТРА ДОПЛЕРОВСКИХ ЧАСТОТ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ КАЧАЮЩЕЙСЯ СФЕРЫ

Приведена методика определения периода качки физического маятника при различных амплитудах качания. Показано, что при амплитудах, не превышающих 20° , период с точностью до 1% равен собственному периоду качки физического маятника в виде качающейся сферы. Даны рекомендации по применению сигнала, отраженного от качающейся сферы, для калибровки доплеровских установок при измерении эффективной площади рассеяния реальных целей и для контроля амплитудно-частотных характеристик приемников.

Требование точности измерения радиолокационной эффективной площади рассеяния (ЭПР), наличие фона (паразитного рассеяния), вызванного отражениями от посторонних предметов и земли, приводят к некоторым особенностям измерительных установок, связанным, главным образом, с методами выделения рассеянных исследуемым объектом полей на фоне паразитных рассеяний.

В этом плане измерительные установки с использованием эффекта Доплера отличаются тем, что позволяют эффективно выделить поля, рассеянные подвижными объектами, и значительно уменьшить влияние отражения от неподвижных предметов. Кроме того, влияние неоднородности поля, облучающего объект, на погрешность измерения также несколько уменьшается, так как при перемещении объекта поле усредняется и влияние случайных его вариаций исключается. Этот метод не требует сложной радиотехнической аппаратуры, за исключением узкополосных усилителей низкой частоты.

Одна из первых установок, использующих эффект Доплера для измерения ЭПР симметричных тел, рассмотрено в работе [1]. В ней описывается метод измерения внутри помещений радиолокационных эффективных площадей объектов путем изменения их положения. Применение синхронного детектирования и техники замещения, состоящей в одновременном измерении и сравнении рассеяний испытуемого и известного объектов, снижает погрешность измерения до $\pm 2\%$. Однако механическая система перемещения объекта путем вращения его в двух плоскостях получается слишком сложной и громоздкой. Другие возможные установки с использованием эффекта Доплера представлены в работе [2]. В этой работе применялось прямолинейное поступательное движение рассе-

ивателя. С помощью специального механизма объект на опоре перемещался по направлению к измерительной установке и обратно с постоянной скоростью. Небольшая скорость перемещения испытуемого объекта приводила к малой величине доплеровского сдвига частоты (не более 10 Гц), что вызывало трудности при разработке узкополосного усилителя низкой частоты. Кроме того, требовалось значительное время для выполнения измерений.

Существенное упрощение измерительных установок, использующих эффект Доплера, может быть достигнуто при облучении свободно качающихся испытуемых объектов, подвешенных на нитях. Однако снятие

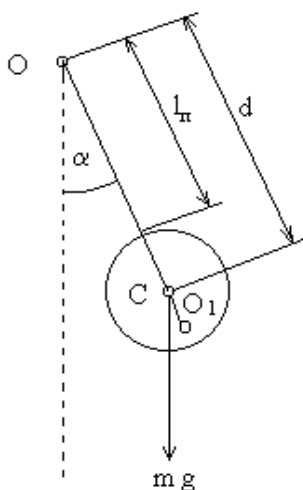


Рисунок 1 - Пояснения к расчету приведенной длины физического маятника

диаграмм рассеяния при качании объектов наталкивается на трудности определения ракурса объекта относительно диаграммы направленности антенны радиолокационной станции (РЛС).

Преодоление указанного препятствия может быть достигнуто на основе использования однозначной зависимости между линейной скоростью объекта и доплеровским сдвигом частоты отраженного сигнала.

Поэтому исследование спектра доплеровских частот сигнала, отраженного от качающегося объекта, актуально.

В данной работе проведено исследование особенностей формирования доплеровского спектра сигнала, отраженного от качающейся сферы. Выбор сферы в качестве объекта исследования обусловлен тем, что сферу наиболее часто используют в качестве эталона ЭПР при калибровке измерительных установок. В основу исследования положены методы электродинамики и теоретической механики.

Для анализа кинематики качающейся сферы можно воспользоваться уравнением математического маятника и рассчитать приведенную длину физического маятника.

Рассмотрим физический маятник (рисунок 1) в виде тонкостенной сферы радиуса r , совершающий колебания под действием собственного веса вокруг неподвижной горизонтальной оси O , не проходящей через центр тяжести C .

Из курса аналитической механики известно, что приведенной длиной l физического маятника называют длину математического маятника, имею-

щего такой же период колебаний

$$l = \frac{J_0}{md}, \quad (1)$$

где J_0 – момент инерции сферы относительно оси О; m – масса сферы; $d = l_n + r$; l_n – длина подвеса сферы; r – радиус сферы.

Момент инерции сферы относительно оси О может быть определен по формуле Штайнера

$$J_0 = J_c + md^2, \quad (2)$$

где J_c – главный центральный момент инерции маятника.

Для тонкостенной сферы

$$J_c = \frac{2}{3}mr^2. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем выражение

$$l = \frac{1}{md} \left(\frac{2}{3}mr^2 + md^2 \right) = \frac{2}{3} \frac{r^2}{d} + d, \quad (4)$$

с помощью которого можно рассчитать приведенную длину маятника по известным значениям длине подвеса l_n и радиуса сферы r .

В общем случае закон качания маятника под действием собственного веса определяется нелинейным дифференциальным уравнением

$$\ddot{\alpha} + \frac{a}{2} \dot{\alpha} + \Omega_0^2 \sin \alpha = 0, \quad (5)$$

где α – угол отклонения маятника от положения равновесия; $\ddot{\alpha} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$;

$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt}$; $a = 2b/ml^2$ – коэффициент затухания; $\Omega_0 = \sqrt{g/l}$ – собственная частота маятника; b – коэффициент упругости среды; l и m – соответственно приведенная длина и масса физического маятника; g – ускорение свободного падения.

Однако определение вида функции $\alpha(t)$ из уравнения (5) требует громоздких вычислений. Для малых амплитуд качания маятника и малого коэффициента затухания уравнение (5) линеаризуется и его решение имеет вид [3]

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin(\Omega t). \quad (6)$$

В работе [4] показано, что период нелинейных колебаний маятника T зависит от начальной амплитуды α_m угла отклонения

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \sqrt{\frac{\alpha_m}{\sin \alpha_m}} = T_0 \sqrt{\frac{\alpha_m}{\sin \alpha_m}}. \quad (7)$$

Здесь через T_0 обозначен период колебания математического маятника, который будем называть собственным периодом, т.е.

$$2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = T_0. \quad (8)$$

Так как величина подкоренного выражения (7) при $\alpha_m \neq 0$ превышает единицу, то величина периода качки, в общем случае, превышает собственный период. Если же величину амплитуды качки устремить к нулю, то период качки будет стремиться к собственному

$$\lim_{\alpha_m \rightarrow 0} T = T_0.$$

Результаты расчетов, выполненных по формуле (7) и приведенных в таблице 1, показывают, что при увеличении амплитуды качания маятника в пределах от 0 до 20° , период возрастает на величину порядка одного процента. Отсюда следует, что в практических расчетах при амплитудах качания маятника в пределах до 20° можно, с погрешностью, не превышающей один процент, принимать период, равным собственному периоду.

Таблица 1 - Период качания сферы при различных амплитудах качания

α_m , град	α_m , рад	$\frac{\alpha_m}{\sin(\alpha_m)}$	$\frac{T}{T_0} = \sqrt{\frac{\alpha_m}{\sin \alpha_m}}$
2,500	0,044	1,000	1,000
5,000	0,087	1,001	1,001
10,000	0,174	1,008	1,004
20,000	0,349	1,020	1,010

Таким образом, приведенная длина физического маятника может быть определена по формуле (4). При амплитудах качания, меньших 20° , период может быть принят равным собственному периоду (8). При больших амплитудах качания период можно определить по формуле (7).

Пусть качающаяся сфера, подвешенная к жесткой опоре (рисунок 1), облучается монохроматической плоской электромагнитной волной.

$$\vec{H}_i = \vec{H}_0 \exp(i\omega_0 t),$$

где ω_0 – несущая частота зондирующего сигнала.

Полагая, что направление излучения зондирующего сигнала совпадает

с плоскостью качания сферы, отраженную волну на входе приемной антенны можно представить в виде

$$\vec{H}_s = \vec{H}_0 \sqrt{\sigma_c} \exp i \left\{ \omega_0 t - 2k \left[R_0 + R(t) \right] \right\}, \quad (9)$$

где $\sigma_c = \pi r^2$ - эффективная площадь рассеяния сферы; r - радиус сферы; R_0 - расстояние от РЛС до вертикальной линии, проходящей через точку подвеса сферы; $R(t)$ - величина отклонения сферы от положения равновесия.

Как известно, мгновенная частота может быть определена как производная от фазы, поэтому из (9) следует:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \omega_0 t - 2k \left[R_0 + R(t) \right] \right\} = \omega_0 - 2k \frac{d}{dt} R(t). \quad (10)$$

Вторая составляющая в правой части этого выражения является мгновенным доплеровским сдвигом частоты отраженного сигнала

$$\omega_d(t) = 2k \frac{d}{dt} R(t). \quad (11)$$

Величина $R(t)$ является проекцией приведенной длины на горизонтальную ось $R(t) = l \sin \alpha(t)$. Для малых углов ее можно представить в виде

$$R(t) = l \alpha(t). \quad (12)$$

После подстановки (6) и (12) в (11) и очевидных преобразований, получаем

$$\omega_d(t) = \frac{4\pi}{\lambda} l \alpha_m \Omega \cos(\Omega t). \quad (13)$$

С учетом (13) выражение (10) можно представить как

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{4\pi}{\lambda} l \alpha_m \Omega \cos(\Omega t). \quad (14)$$

Отсюда видно, что для отраженного сигнала величина девиации частоты равна

$$\Delta \omega_d = \frac{4\pi}{\lambda} l \alpha_m \Omega. \quad (15)$$

Из (9) и (14) видно, что сигнал, отраженный от качающейся сферы, представляет собой частотно-модулированный сигнал с постоянной амплитудой, величина которой пропорциональна корню квадратному из ЭПР сферы. Частота отраженного сигнала изменяется в соответствии выражением (14). Из (15) следует, что спектр отраженного сигнала симметричен относительно зондирующей частоты, а его эффективная ширина равна

$$2\Delta \omega_d = \frac{8\pi}{\lambda} l \alpha_m \Omega . \quad (16)$$

Таким образом, проведенный анализ спектра доплеровских частот сигнала, отраженного от качающейся сферы, позволил получить следующее:

- соотношение (4) для расчета приведенной длины физического маятника;
- зависимость (7) периода качки физического маятника от амплитуды;
- соотношение (16) для расчета эффективной ширины спектра частот сигнала, отраженного от качающейся сферы.

Показано, также, что сигнал, отраженный от качающейся сферы, может быть использован в качестве калибровочного сигнала для доплеровских измерительных установок при измерении ЭПР реальных целей, а также тестового сигнала для контроля АЧХ приемника доплеровских измерительных установок.

Полученные результаты будут использованы при разработке методики измерения ЭПР реальных целей доплеровскими измерительными установками, а также при разработке методики контроля АЧХ приемников этих установок, что составит перспективы дальнейших исследований.

Библиографический список

- 1.—Scharfman H. Antenna scattering measurements by modulation of the Scatterer / H. Scharfman, D. King // Proc. IRE. — 1954. — V. 42. — № 5. — P. 854 – 858.
2. Hey J.S. The Scattering of Electromagnetic Waves by Conducting Spheres and Discs / J. S. Hey, G.S. Stewart, J.T. Pinson // The Proc. of the Phys. Society Section B. — 1956. — V. 69. — № 442 B. — P. 321 — 329.
3. Краснов Л. М. Решение обратной задачи рассеяния электромагнитной энергии на качающихся объектах /Л. М. Краснов // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2000. — Вып. 26. — С. 41 – 46.
4. Краснов Л. М. Решение обратной задачи рассеяния электромагнитных волн на сфере, подверженной нелинейной качке /Л. М. Краснов // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 198 – 204.

Поступила в редакцию 21.01.2004 г.