Алгоритмы функционирования радиотехнических систем: передача, прием и обработка сигналов

Научная статья
УДК 621.391
DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202402-00

Определение расщепляющей функции по спектру сигнала

А.А. Зорин[1]

[1] АО Научно-технический Центр «Радуга» (Москва, Россия)

[1] zorin_andrey@list.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), в телеметрии геостационарных спутников и дальней космической связи, а также в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированной апертурой (МПРСА) активно применяются сигналы с расщеплением спектра, представляющие собой частный случай сигналов с расширением спектра. Несмотря на то, что эти сигналы достаточно хорошо исследованы, актуальными на сегодняшний день остаются вопросы классификации вариантов расщепления спектра и сравнения спектров таких сигналов. Кроме того, не исследована и обратная задача – определение варианта расщепления по расщепленному спектру неизвестного сигнала.

Цель. Рассмотреть варианты расщепления спектра: для всех видов модуляции (фазовой, амплитудной, частотной) и для некоторых избранных видов функции поднесущей частоты (гармонической, меандровой и функции периодических треугольных импульсов), а также провести исследование возможности определения функции поднесущей частоты (расщепляющей функции) и вида модуляции при наличии расщепленного спектра неизвестного сигнала.

Результаты. Проведены обзор и классификация вариантов расщепления спектра, базирующихся на умножении модулирующей функции на периодическую функцию поднесущей частоты. Выполнен сравнительный анализ результирующих спектров. Выявлено, что, несмотря на то, что рассмотренные варианты расщепления спектра приводят к похожим спектрам, имеется возможность отличить амплитудную модуляцию от фазовой и частотной, гармоническую амплитудную от меандровой амплитудной, гармоническую фазовую от меандровой фазовой.

Практическая значимость. Представленные результаты могут быть использованы при построении систем распознавания и радиомониторинга.

Ключевые слова

Расщепление спектра, расщепляющая функция, поднесущая частота, меандровая функция, функция периодических треугольных импульсов

Для цитирования

Зорин А.А. Определение расщепляющей функции по спектру сигнала // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 2. С. 96–107. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202402-00

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В современных системах связи и управления широко применяются сигналы с расширением спектра. Частным случаем этих сигналов являются *сигналы с расщеплением спектра,* или *сигналы с расщепленным спектром*, энергия которых сосредоточена в двух и более разнесенных участках спектра [1].

В составе модулирующей функции сигналов с расщеплением спектра присутствует поднесущее периодическое колебание с периодом, которое в коэффициент кратности раз короче длительности передава-

емых информационных символов, что и приводит к расщеплению спектра [2]. Частота этого поднесущего периодического колебания называется *поднесущей частотой*, а функция этого колебания – *функцией поднесущей частоты,* или *расщепляющей функцией*. Способ расщепления спектра сигнала заключается в умножении модулирующей функции исходного сигнала на периодическую функцию поднесущей частоты.

Сигналы, использующие технологию расщепления спектра, получили широкое распространение в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) [2, 3], в телеметрии геостационарных спутников и дальней космической связи [4, 5], а также в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированной апертурой (МПРСА) [1, 6].

При построении систем радиомониторинга и радиоконтроля ключевая роль отводится задаче распознавания сигналов систем радиосвязи при заранее неизвестных параметрах принимаемого сигнала. В частности, распознавание по расщепленному спектру сигнала. В рамках этого направления актуальны следующие задачи:

классификация вариантов расщепления спектра и сравнение спектров сигналов при различных вариантах расщепления,

определение варианта расщепления по расщепленному спектру неизвестного сигнала.

Ц е л ь р а б о т ы – рассмотреть варианты расщепления спектра для всех видов модуляции (фазовой, амплитудной, частотной) и для некоторых избранных видов функции поднесущей (гармонической, меандровой и функции периодических треугольных импульсов), а также провести исследование возможности определения функции поднесущей (расщепляющей функции) и вида модуляции при наличии расщепленного спектра неизвестного сигнала.

Исходные сигналы для расщепления спектра

Прежде чем обсуждать различные варианты расщепления спектра, необходимо определить, к каким сигналам будет применяться расщепление, т.е. к сигналам с какой модулирующей функцией и при каком виде модуляции. Остановимся на простых случаях манипуляции сигнала фазой, амплитудой, частотой.

Сигнал двоичной фазовой манипуляции BPSK (без формирующего фильтра) описывается как

$$s(t) = A\cos\{\omega t + \varphi(t)\}, \tag{1}$$

где $\varphi(t)$ – модуляция фазой:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0, c_{i(t)} = 1, \\ \pi, c_{i(t)} = 0; \end{cases} \tag{2}$$

A и ω – константы; c_i – передаваемая битовая последовательность; $i(t) = \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor$; $T = \frac{1}{f_t}$ – период; f_t – тактовая частота.

График спектральной плотности мощности в логарифмических координатах (здесь и далее – спектр сигнала) для BPSK-сигнала приведен на рис. 1.

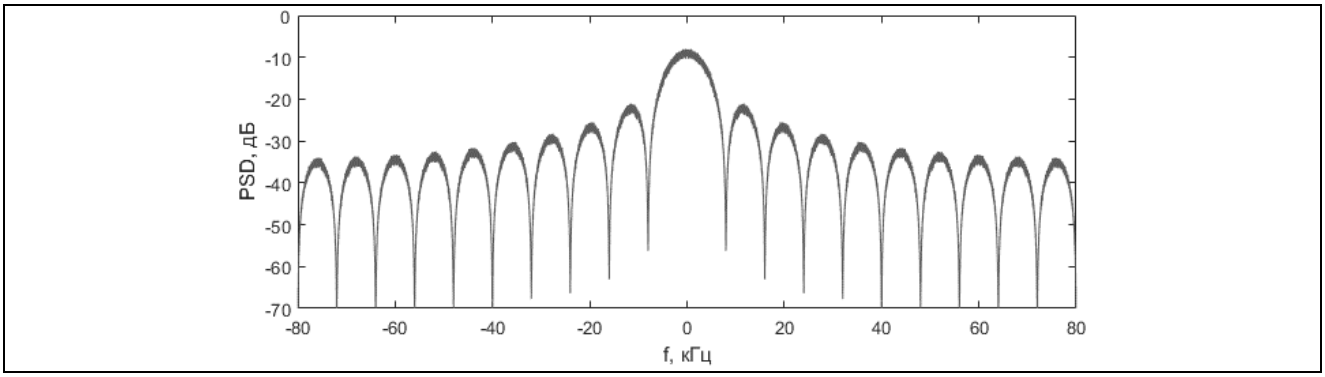

Рис 1. Спектр BPSK-сигнала для f_t = 8 кГц

Fig 1. Spectrum of BPSK signal where f_t = 8 kHz

Подставляя (2) в выражение (1), получим

$$s(t) = Ad(t)\cos(\omega t), \tag{3}$$

где $d(t)$ – код без возвращения к нулю (non-Return-to-Zero, NRZ) [7]:

$$d(t) = \begin{cases} 1, \ c_{i(t)} = 1, \\ -1, \ c_{i(t)} = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Из выражений (1) и (3) следует, что BPSK-сигнал можно трактовать и как сигнал фазовой модуляции, и как сигнал амплитудной модуляции.

Для частотной модуляции аналогичный «по простоте» сигнал запишем как

$$s(t) = A\cos\left\{\left[\omega + md(t)\right]t\right\}, \tag{5}$$

где m – индекс модуляции.

Для соответствия с BPSK-сигналом будем полагать, что $m << f_t$. В противном случае, спектр сигнала сам по себе будет если не расщеплен, то точно расширен в силу природы частотной модуляции, а это нежелательный для текущего рассмотрения аспект.

Спектр сигнала с частотной модуляцией при $m << f_t$ изображен на рис. 2.

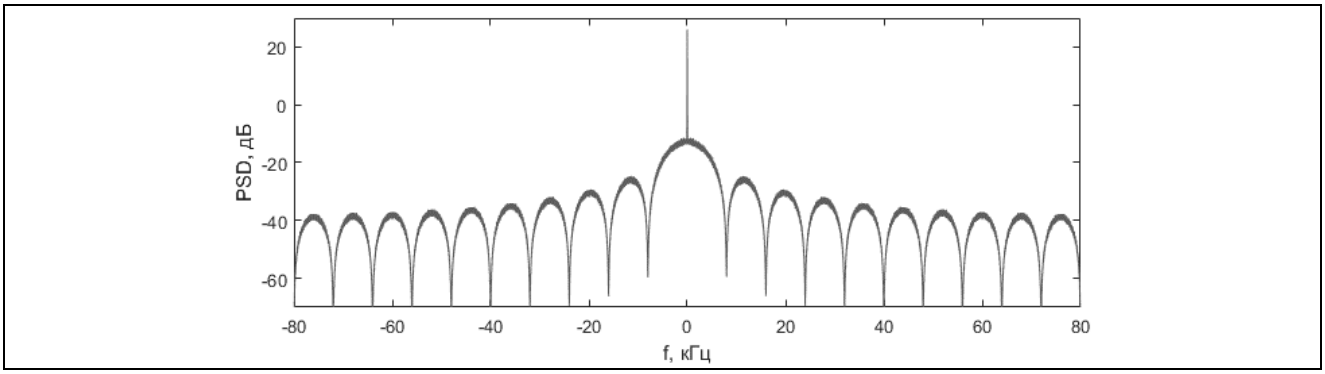

Рис. 2. Спектр сигнала с частотной модуляцией для $m << f_t$, f_t = 8 кГц

Fig. 2. Spectrum of frequency modulated signal where $m << f_t$, f_t = кГц

Легко убедиться, что выражение (5) эквивалентно следующему:

$$s(t) = \frac{A}{2}\left[\cos\left\{\left(\omega - m\right)t\right\} + \cos\left\{\left(\omega + m\right)t\right\} - d(t)\cos\left\{\left(\omega - m\right)t\right\} + d(t)\cos\left\{\left(\omega + m\right)t\right\}\right].$$

Следовательно, сигнал с частотной модуляцией можно представить как сумму двух обычных гармонических функций и двух обычных BPSK-функций вида (3). Это разложение и объясняет форму спектра.

Сигналы, описываемые формулами (1), (3), (5), являются наиболее простыми сигналами с фазовой, амплитудной и частотной модуляциями. Именно на них проще всего изучать расщепление спектра, рассматривая их как исходные сигналы для процесса расщепления.

Расщепление спектра сигнала при амплитудной модуляции

1. *Гармоническая амплитудная модуляция* – самый простой и известный вариант расщепления спектра сигнала, при котором сигнал умножается на гармоническую функцию [8]:

$$s_1(t) = Ad(t)\cos\left(\omega_s t\right)\cos\left(\omega t\right),$$

где ω_s – поднесущая (subcarrier) частота в круговой форме: $\omega_s = 2\pi f_s$, f_s – поднесущая частота.

Спектр сигнала с гармонической амплитудной модуляцией представлен на рис. 3.

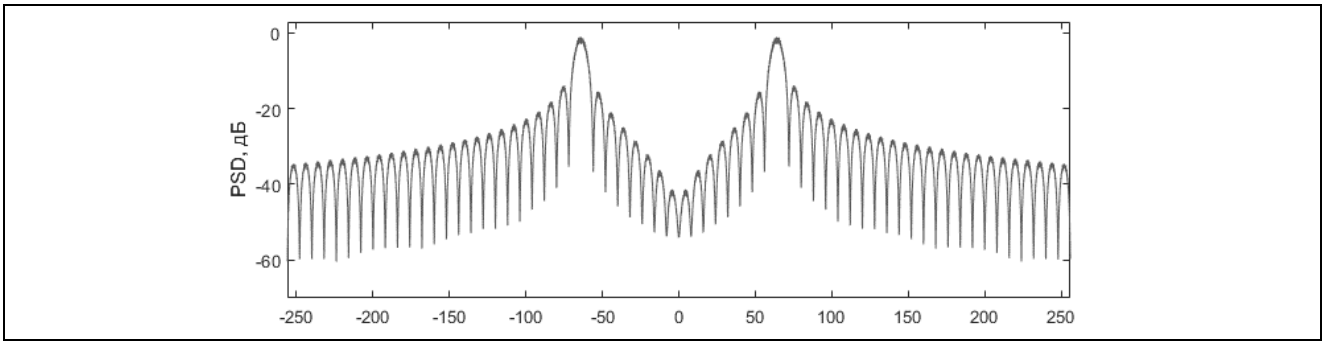

Рис. 3. Спектр сигнала $s_1(t)$ для $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig. 3. Spectrum of signal $s_1(t)$ where $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

2. *Меандровая амплитудная модуляция* предполагает умножение сигнала на меандровую функцию, подобно тому, как это происходит при BOC-модуляции [3]:

$$s_2(t) = Ad(t)s_c(t)\cos(\omega t),$$

где

$$s_c = \operatorname{sign}\left[\sin(2\pi f_s t)\right], \tag{6}$$

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Как видно из рис. 4, спектр сигнала с меандровой амплитудной модуляцией состоит из двух частей, а энергия содержится, в основном, в главных BPSK-подобных боковых лепестках (sidelobes), которые располагаются на частотах $\frac{\omega}{2\pi} + f_s$ и $\frac{\omega}{2\pi} - f_s$. Кроме того, на кратных поднесущим частотах находятся боковые лепестки ме́ньшей мощности (на рис. 4 они обрезаны).

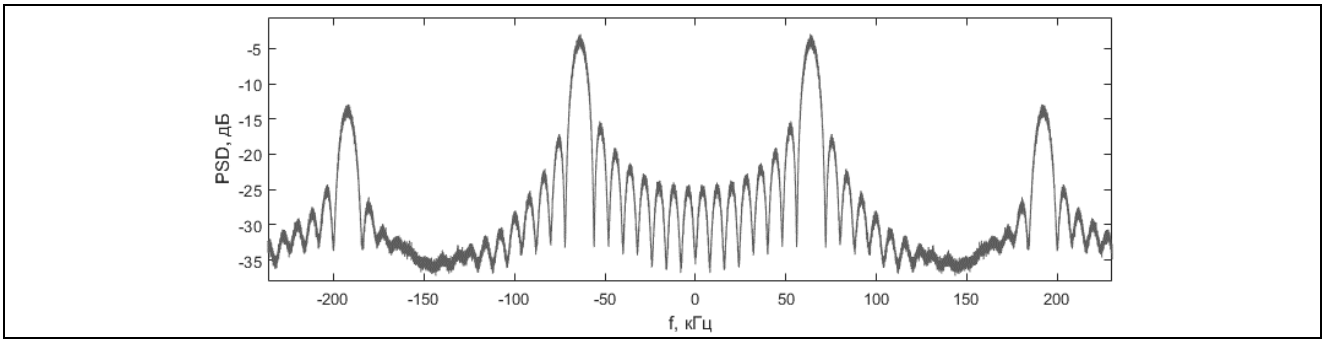

Рис 4. Спектр сигнала $s_2(t)$ для $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 4. Spectrum of signal $s_2(t)$ where $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

Различают синусоидальную и косинусоидальную форму гармонической функции поднесущей частоты. Синусоидальную форма описывается формулой (6), а косинусоидальная форма как

$$s_c(t) = \operatorname{sign}\left[\cos(2\pi f_s t)\right].$$

Кроме того, существует смешанная форма гармонической функции поднесущей частоты, определяемая как полусумма синусоидальной и косинусоидальной форм:

$$s_c(t) = \frac{\operatorname{sign}\left[\cos(2\pi f_s t)\right] + \operatorname{sign}\left[\sin(2\pi f_s t)\right]}{2}.$$

На рис. 5 приведены спектры сигнала с меандровой амплитудной модуляцией для синусоидальной и для косинусоидальной форм функции поднесущей частоты.

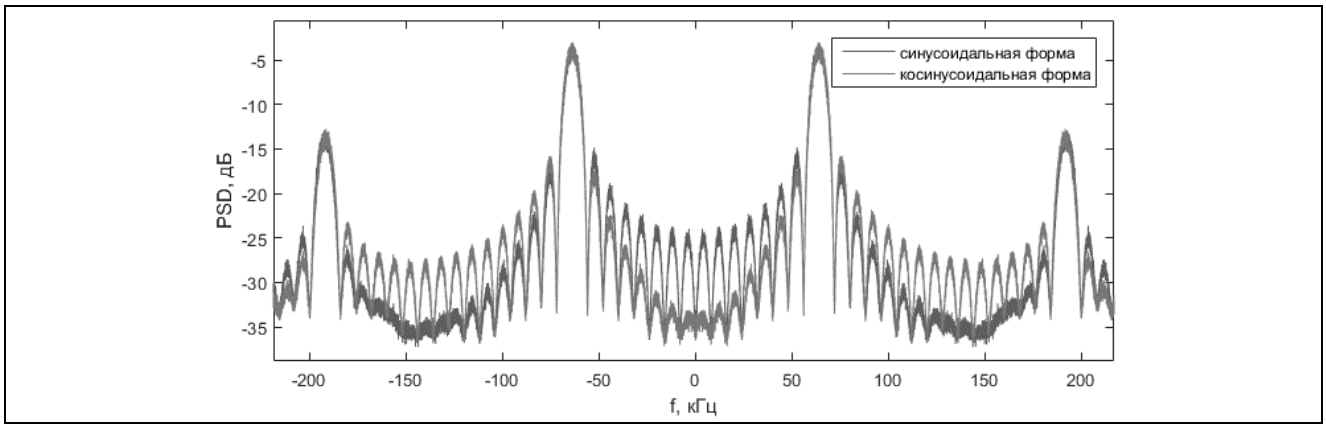

Рис 5. Спектры сигнала $s_2(t)$ для синусоидальной и косинусоидальной формы для $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 5. Spectrums of signal $s_2(t)$ for sinusoidal and cosinusoidal shapes where $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

3. *Амплитудная модуляция периодическими треугольными импульсами* (ПТИ) – вариант расщепления спектра сигнала, при котором сигнал умножается на функцию ПТИ $r(t)$ (рис. 6):

$$s_3(t) = A\,d(t)\,r(t)\cos(\omega t),$$

где

$$r(t) = 4 f_s \hat{t}\,\mathrm{sign}(\hat{t}) - 1, \qquad (7)$$

где $\hat{t} = \mathrm{mod}(t, T_s) - \dfrac{T_s}{2}$; $\mathrm{mod}(t, T_s)$ – функция остатка от деления t на T_s; T_s – период поднесущей: $T_s = \dfrac{1}{f_s}$, f_s – значение поднесущей.

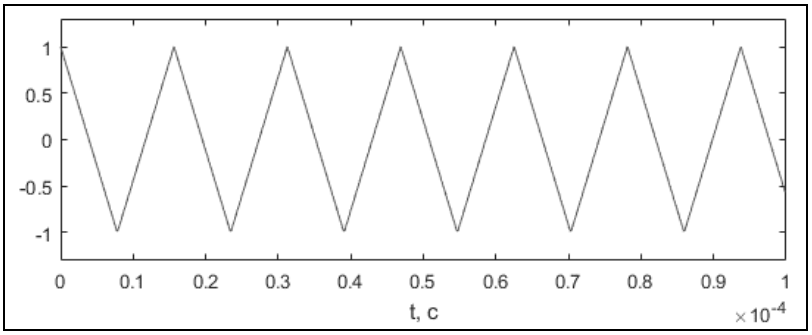

Рис 6. Графическое представление функции ПТИ $r(t)$

Fig 6. Function of periodic triangular impulses $r(t)$

Спектр сигнала с амплитудной модуляцией ПТИ показан на рис. 7.

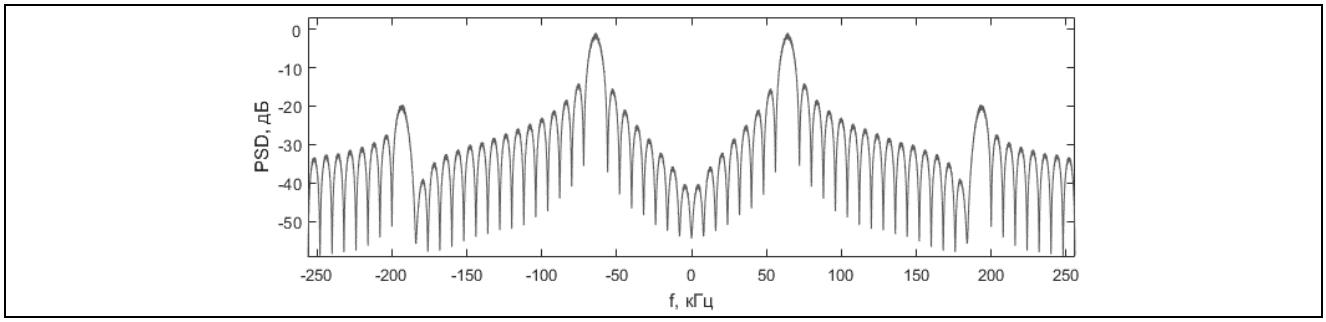

Рис 7. Спектр сигнала $s_3(t)$ для $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 7. Spectrum of signal $s_3(t)$ where $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

Расщепление спектра сигнала при фазовой модуляции

1. *Гармоническая фазовая модуляция*. Здесь для расщепления спектра модулирующая функция, относящаяся к фазе колебания, фактически умножается на гармоническую функцию [8].

Усложнив фазовую функцию $\varphi(t)$ в исходном выражении (1), получим

$$s_4(t) = A\cos\left\{\omega t + m\,d(t)\sin\left(2\pi f_s t\right)\right\}$$

где $d(t)$ также определяется из (4), а m – индекс модуляции.

Спектр сигнала с гармонической фазовой модуляцией изображен на рис. 8.

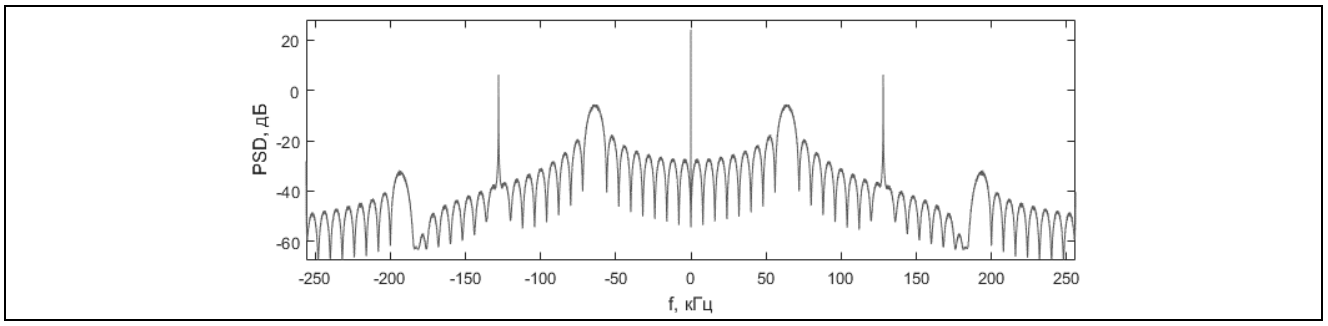

Рис 8. Спектр сигнала $s_4(t)$ для $m = 1$, $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 8. Spectrum of signal $s_4(t)$ where $m = 1$, $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

2. *Меандровая фазовая модуляция*. Аналогично предыдущим рассуждениям, после умножения фазы колебания не на гармоническую функцию, а на меандр, сигнал принимает следующий вид:

$$s_5(t) = A\cos\left\{\omega t + md(t)\operatorname{sign}\left[\sin\left(2\pi f_s t\right)\right]\right\}. \quad (8)$$

Спектр сигнала с меандровой фазовой модуляцией показан на рис. 9.

Как было отмечено ранее, спектр сигнала может отличаться в зависимости от того, какая форма меандра используется – синусная или косинусная. Спектры сигнала с гармонической меандровой модуляцией для синусоидальной и косинусоидальной форм приведены на рис. 10.

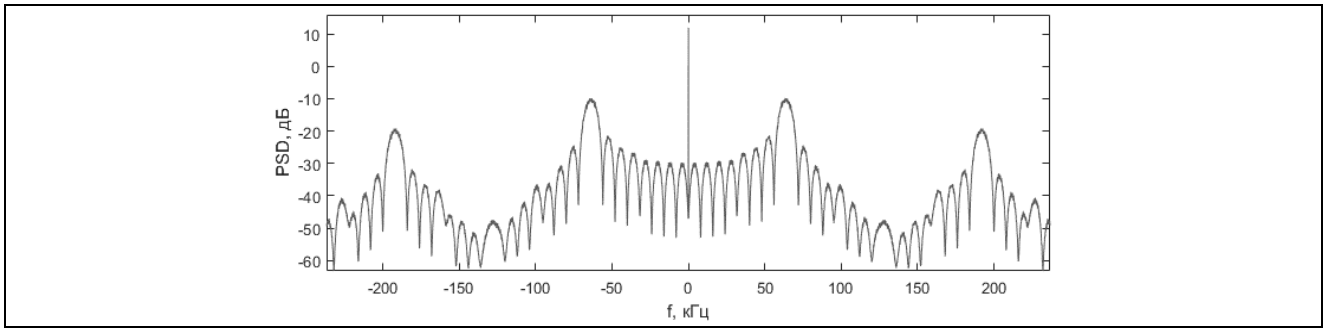

Рис 9. Спектр сигнала $s_5(t)$ для $m = 1$, $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 9. Spectrum of signal $s_5(t)$ where $m = 1$, $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

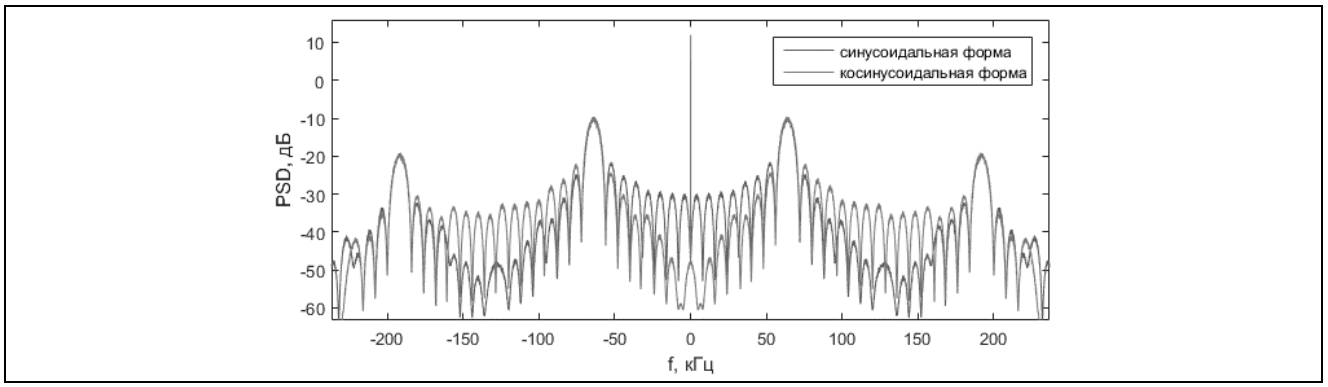

Рис 10. Спектры сигнала $s_5(t)$ для синусоидальной и косинусоидальной формы для $m = 1$, $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig 10. Spectrums of signal $s_5(t)$ for sinusoidal and cosinusoidal shapes where $m = 1$, $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

Существуют вырожденные значения индекса модуляции m. При $m=\pi$ формула (8) преобразуется в простую гармоническую функцию

$$s_5(t)=-A\cos(\omega t),$$

а при $m=\dfrac{\pi}{2}$ – в меандровую амплитудную модуляцию вида

$$s_5(t)=-Ad(t)\times$$
$$\times\operatorname{sign}\left[\sin(2\pi f_s t)\right]\sin(\omega t).$$

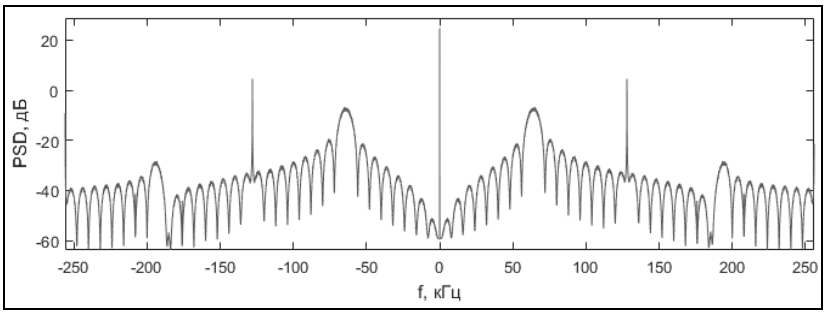

Рис 11. Спектр сигнала $s_6(t)$ для $m=1$, $f_t=8$ кГц, $f_s=64$ кГц

Fig 11. Spectrum of signal $s_6(t)$ where $m=1$, $f_t=8$ kHz, $f_s=64$ kHz

3. *Фазовая модуляция ПТИ* описывается выражением

$$s_6(t)=A\cos\{\omega t+md(t)r(t)\}$$

где $r(t)$ и $d(t)$ определяются соответственно из (7) и (4).

Спектр сигнала с фазовой модуляцией ПТИ изображен на рис. 11.

Расщепление спектра сигнала при частотной модуляции

При частотной модуляции для расщепления спектра модулирующая функция, относящаяся к частоте колебания, фактически умножается на функцию поднесущего колебания. Аналогично рассуждениям для амплитудной и фазовой модуляции, приведем следующие выражения:

1. *Гармоническая частотная модуляция*: $s_7(t)=A\cos\left\{\left[\omega+md(t)\cos(2\pi f_s t)\right]t\right\}$.

2. *Меандровая частотная модуляция*: $s_8(t)=A\cos\left\{\left(\omega+md(t)\operatorname{sign}\left[\cos(2\pi f_s t)\right]\right)t\right\}$.

3. *Частотная модуляция ПТИ*: $s_9(t)=A\cos\left\{\left[\omega+md(t)r(t)\right]t\right\}$.

На рис. 12 и 13 приведены соответственно спектры сигнала с гармонической и меандровой частотными модуляциями для различных значений индекса модуляции *m*, а на рис. 14 – спектр сигнал с частотной модуляцией ПТИ для $m=1$.

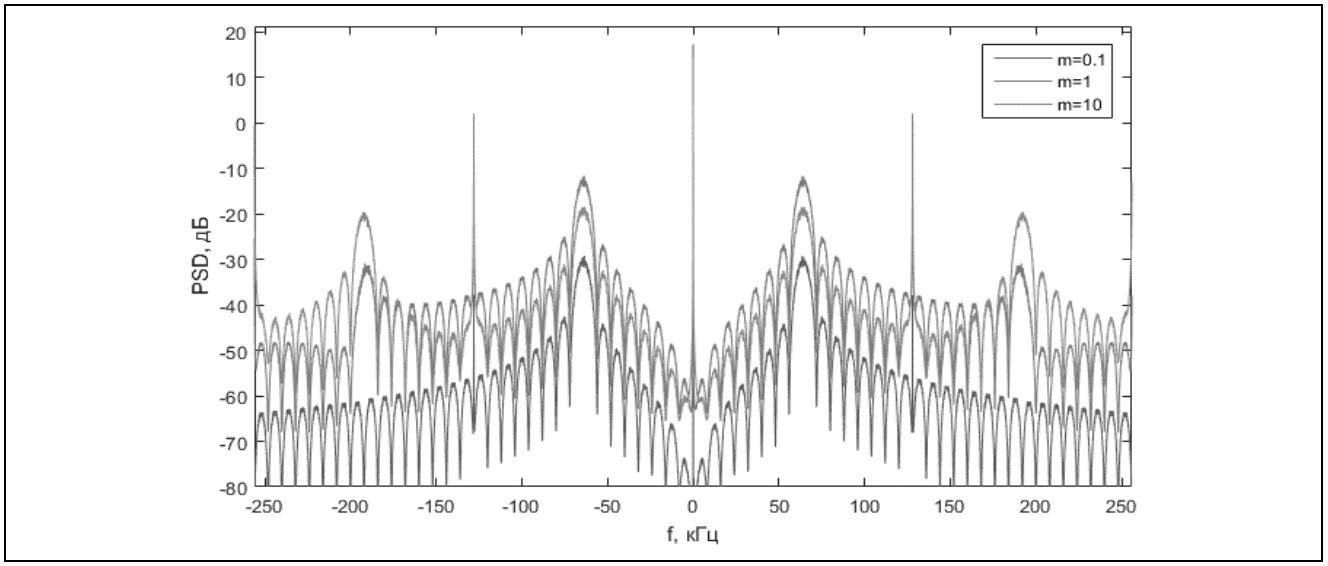

Рис. 12. Спектр сигнала $s_7(t)$ для *m*=0,1; 1; 10 при $f_t=8$ kHz, $f_s=64$ kHz

Fig. 12. Spectrum of signal $s_7(t)$ for *m*=0,1; 1; 10 where $f_t=8$ kHz, $f_s=64$ kHz

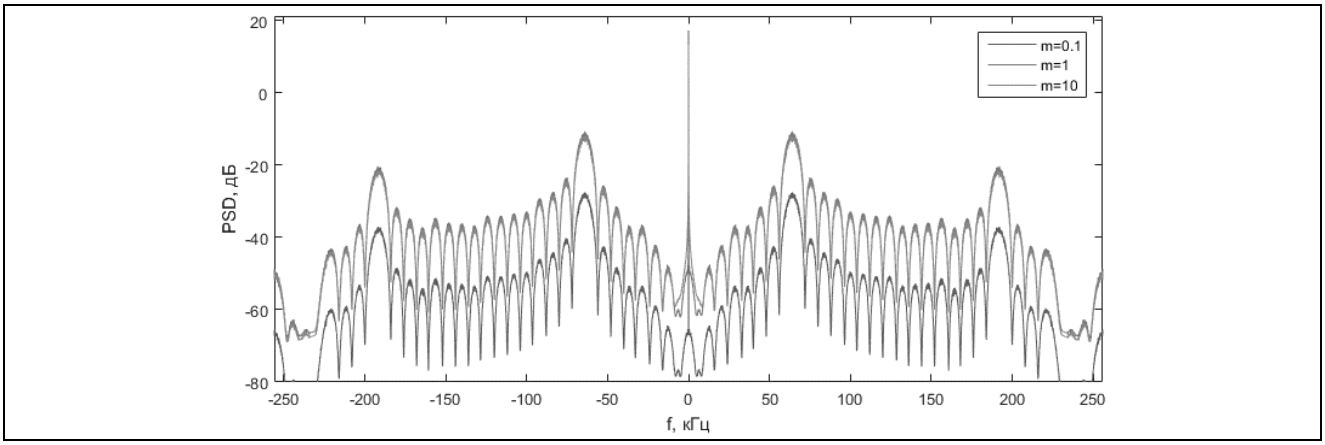

Рис. 13. Спектр сигнала $s_8(t)$ для m=0,1; 1; 10 при $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

Fig. 13. Spectrum of signal $s_8(t)$ for m=0,1; 1; 10 where $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

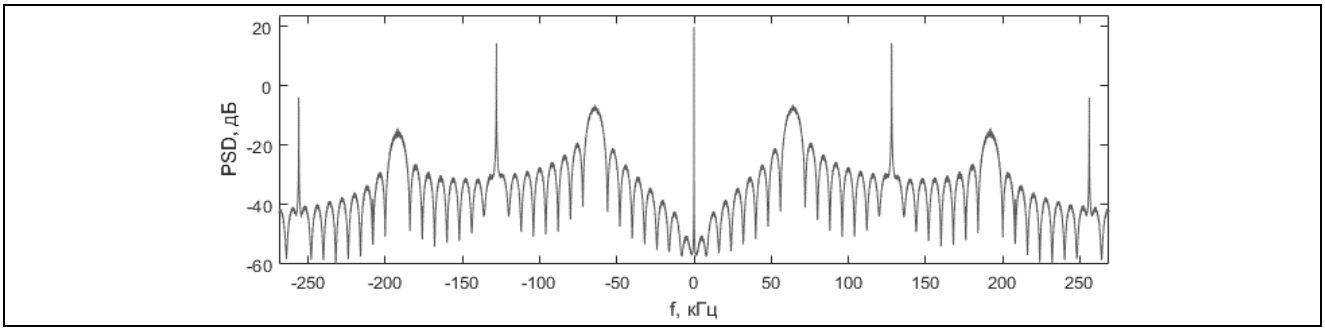

Рис. 14. Спектр сигнала $s_9(t)$ для m = 1, $f_t = 8$ кГц, $f_s = 64$ кГц

Fig. 14. Spectrum of signal $s_9(t)$ where m = 1, $f_t = 8$ kHz, $f_s = 64$ kHz

Результаты сравнительного анализа вариантов расщепления спектра сигнала

Результаты проведенного сравнения вариантов расщепления спектра сигнала для наглядности сведены в таблицу.

Таблица. ***Результаты сравнительного анализа вариантов расщепления спектра***

Вид модуляции	Число главных лепестков	Остаточная (неподавленная) несущая	Расположение главных лепестков
1	2	3	4
Гармоническая амплитудная	2	Нет	$f_н \pm f_s$
Меандровая амплитудная	Много, но только в 2 центральных заключена основная мощность	Нет	$f_н + (2k-1) f_s$, $k \in Z$
Амплитудная ПТИ	Много, но только в 2 центральных заключена основная мощность	Нет	$f_н + (2k-1) f_s$, $k \in Z$
Гармоническая фазовая (m=1)	2 основных и 2 мéньшей мощности	Да, пики на частотах $f_н \pm 2kf_s$, $k = 0,1,2$	$f_н + (2k-1) f_s$, $k = -1,0,1,2$
Меандровая фазовая (m=1)	Много, но только в 2 центральных заключена основная мощность	Да, пик на частоте $f_н$	$f_н + (2k-1) f_s$, $k \in Z$
Фазовая ПТИ (m=1)	2 основных и 2 мéньшей мощности	Да, пики на частотах $f_н \pm 2kf_s$, $k \in Z$	$f_н + (2k-1) f_s$, $k = -1,0,1,2$

Продолжение табл. на с. ??

Окончание таблицы. Начало с. ??

1	2	3	4
Гармоническая частотная	От 2 до ∞ в зависимости от индекса модуляции, в 2 центральных заключена основная мощность	От 1 до ∞ пиков в зависимости от индекса модуляции на частотах $f_н \pm 2kf_s$, $k \in Z$	$f_н + (2k-1)f_s$, $k \in Z$
Меандровая частотная	Много, но только в 2 центральных заключена основная мощность	Да, пик на частоте $f_н$	$f_н + (2k-1)f_s$, $k \in Z$
Частотная ПТИ	От 2 до ∞ в зависимости от индекса модуляции, в 2 центральных заключена основная мощность	От 1 до ∞ пиков в зависимости от индекса модуляции на частотах $f_н \pm 2kf_s$, $k \in Z$	$f_н + (2k-1)f_s$, $k \in Z$

Заключение

В результате сравнительного анализа вариантов расщепления спектра, основывающихся на умножении модулирующей функции на периодическую функцию поднесущей частоты, выявлено следующее:

Несмотря на то, что различные варианты расщепления спектра приводят к похожим спектрам, вполне возможно различить спектры, в частности: амплитудную модуляцию от фазовой и частотной, гармоническую амплитудную от меандровой амплитудной, гармоническую фазовую от меандровой фазовой. Однако, присутствуют случаи, когда отличить спектры практически невозможно (особенно при наличии шума), например, гармоническая частотная модуляция и частотная модуляция ПТИ.

Список источников

1. *Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Иванов В.Ф., Леконцев Д.А.* Метод повышения разрешающей способности многопозиционных радиолокационных систем с синтезированной апертурой на основе расщепления спектра сигнала с линейной частотной модуляцией // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 670. С. 27–31.
2. *Ярлыков М.С.* Меандровые шумоподобные сигналы (BOC-сигналы) и их разновидности в спутниковых навигационных системах: Учебник. М.: Радиотехника. 217. 416 с.
3. *Вейцель А.В.* Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных систем // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 7. С. 6.
4. ETSI EN 301 926. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Radio Frequency and Modulation Standard for Telemetry, Command and Ranging (TCR) of Communications Satellites. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301900_301999/301926/01.03.00_20/en_301926v010300a.pdf.
5. *Shihabi M.M., Tien Manh Nguyen, and Hinedi S.M.* A comparison of telemetry signals in the presence and absence of a subcarrier // in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Feb. 1994. V. 36. № 1. P. 60–73. DOI: 10.1109/15.265481.
6. *Бахолдин В.С.* Метод повышения разрешения способности судового радиолокатора на основе сигнала с линейной частотной модуляцией и расщепленным спектром // Навигация и гидрография. 2018. № 53. С. 7–13.
7. *Прокис Дж.* Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. *Д.Д. Скловского*. М.: Радио и связь. 2000.
8. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер. 2002.

Информация об авторе

Андрей Александрович Зорин – руководитель отдела разработки программного обеспечения
SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 10.01.2024
Одобрена после рецензирования 15.01.2024
Принята к публикации 31.01.2024

Original article

Determination of the splitting function by signal spectrum

A.A. Zorin[1]

[1] JSC Scientific and technical center «Raduga» (Moscow, Russia)

[1] zorin_andrey@list.ru

Abstract

In modern telecommunication, spread spectrum techniques often used. Special case of spread spectrum – spectrum splitting. This technique is characterized by signals whose energy is concentrated in two or more spaced portions of the spectrum. If there is a modulating subcarrier in modulation function, and this subcarrier is shorter then duration of transmitted information symbols by a multiplicity factor, then this function provide spectrum splitting. The frequency of this subcarrier called subcarrier frequency, and function of this subcarrier called subcarrier frequency function or splitting function.

The main problem of this article is the ability to determine by which split function the original spectrum of the unknown signal has obtained, because during the analysis it is necessary to understand general patterns of the signal formation.

The article discusses various signals with spectrum splitting. There is an overview of the methods of spectrum splitting obtained for different types of modulation (phase, amplitude, frequency) and some splitting functions (harmonic, meander and functions of periodic triangular pulses). The spectrums of the signals obtained by different splitting functions are studied and conclusions has drawn on how to determine the splitting function and the type of modulation for the spectrum splitting of an unknown signal.

Keywords

Spectrum splitting, splitting function, subcarrier frequency, meander function, function of periodic triangular impulses

For citation

Zorin A.A. Determination of the splitting function by signal spectrum. Radiotekhnika. 2024. V. 88. № 2. P. 96–106. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202402-00 (In Russian)

References

1. Baholdin V.C., Gavrilov D.A., Ivanov V.F., Lekoncev D.A. Metod povyshenija razreshajushhej sposobnosti mnogopozicionnyh radiolokacionnyh sistem s sintezirovannoj aperturoj na osnove rasshheplenija spektra signala s linejnoj chastotnoj moduljaciej. Trudy Voenno-kosmicheskoj akademii imeni A.F. Mozhajskogo. 2019. № 670. S. 27–31 (in Russian).
2. Jarlykov M.S. Meandrovye shumopodobnye signaly (VOS-signaly) i ih raznovidnosti v sputnikovyh navigacionnyh sistemah: Uchebnik. M.: Radiotehnika. 217. 416 s. (in Russian).
3. Vejcel' A.V. Novyj klass meandrovyh shumopodobnyh radiosignalov dlja radionavigacionnyh sistem. Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. 2009. T. 16. № 7. S. 6 (in Russian).
4. ETSI EN 301 926. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Radio Frequency and Modulation Standard for Telemetry, Command and Ranging (TCR) of Communications Satellites. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301900_301999/301926/01.03.00_20/en_301926v010300a.pdf.
5. Shihabi M.M., Tien Manh Nguyen, and Hinedi S.M. A comparison of telemetry signals in the presence and absence of a subcarrier. in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Feb. 1994. V. 36. № 1. P. 60–73. DOI: 10.1109/15.265481.
6. Baholdin V.S. Metod povyshenija razreshenija sposobnosti sudovogo radiolokatora na osnove signala s linejnoj chastotnoj moduljaciej i rasshheplennym spektrom. Navigacija i gidrografija. 2018. № 53. S. 7–13 (in Russian).
7. Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov. SPb: Piter. 2002 (in Russian).
8. Prokis Dzh. Cifrovaja svjaz': Per. s angl. Pod red. D.D. Sklovskogo. M.: Radio i svjaz'. 2000 (in Russian).

Information about the author

Andrey A. Zorin – Head of Software Development Department

The article was submitted 10.01.2024
Approved after reviewing 15.01.2024
Accepted for publication 31.01.2024