

Влияние формы модулирующего сигнала на спектр выходного сигнала радиолокатора непрерывного излучения с частотной модуляцией

С.А. Королёв, А.В. Зайцев

Институт физики микроструктур РАН

Аннотация: в работе теоретически исследуется влияние формы модулирующего сигнала на спектр выходного сигнала радиолокатора непрерывного излучения с частотной модуляцией. Из-за наличия нежелательной зависимости мощности опорного сигнала от частоты на выходе приёмного элемента возникает паразитный сигнал, пропорциональный мощности опорного сигнала и зависящий от формы модулирующего сигнала, что может существенно ограничивать чувствительность системы. Таким образом, возникает задача определения оптимальной формы модулирующего сигнала с точки зрения отношения уровней полезного и паразитного сигналов на выходе приёмного элемента. В работе приведены результаты анализа спектров полезного и паразитного сигналов для наиболее распространённых форм модулирующего сигнала, обсуждаются преимущества и недостатки проанализированных форм сигнала.

Ключевые слова: радиолокатор непрерывного излучения, модуляция частоты, мощность опорного сигнала, форма модуляции, спектр выходного сигнала

1. Введение

В последнее время метод радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией [1] находит широкое применение при создании матричных систем миллиметрового диапазона [2–4]. Этому способствует тот факт, что обработка сигнала после смесителя выполняется в диапазоне низких частот, что существенно упрощает реализацию схем обработки. Данная особенность, однако, может приводить к дополнительным проблемам, связанным с повышенным уровнем шума и паразитных сигналов на низких частотах, что приводит к снижению чувствительности радиолокатора.

Если мощность опорного сигнала, поступающего на смесительный элемент, имеет частотную зависимость, то частотная модуляция данного сигнала приводит одновременно и к амплитудной модуляции с тем же периодом. На смесительном элементе происходит детектирование амплитудно-модулированного опорного сигнала, и спектр данного продетектированного сигнала может пересекаться со спектром полезного сигнала.

Чтобы устранить описанный негативный эффект, требуется устранить частотную зависимость мощности опорного сигнала в рабочем диапазоне частот, однако это не всегда возможно, или возможно с существенным усложнением схемы радиолокатора. Другим способом является перенос спектра полезного сигнала на более высокие частоты, что достигается сдвигом частоты опорного сигнала. Данный подход также требует внесения конструктивных изменений в схему радиолокатора. Реализация известных способов борьбы с паразитным низкочастотным сигналом ещё более усложняется при переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн. По этой причине важным является выбор оптимальной формы модулирующего сигнала, которая бы, во-первых, обеспечивала удовлетворительную форму спектра полезного сигнала, и, во-вторых, достаточно низкий уровень паразитного сигнала.

В данной работе проводится теоретический анализ спектров выходного сигнала для таких форм модулирующего сигнала, как синусоидальная, треугольная и пилообразная. Выводятся выражения для спектров полезного и паразитного сигналов для каждой из этих форм. На основе полученных данных обсуждаются особенности использования указанных форм модулирующего сигнала.

2. Амплитудные спектры полезного и паразитного сигналов

Пусть частота сверхвысокочастотного сигнала изменяется во времени t по закону

$$f(t) = f_0 + \frac{B}{2} g(t), \quad (1)$$

где f_0 — центральная частота, B — размах модуляции, а безразмерная функция $g(t)$ задаёт форму модуляции, синусоидальную, треугольную или пилообразную, соответственно:

$$g(t) = \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (2a)$$

$$g(t) = \begin{cases} \frac{4t}{T}, & 0 \leq t < \frac{T}{4}, \\ 2\left(1 - \frac{2t}{T}\right), & \frac{T}{4} \leq t < \frac{3T}{4}, \\ 4\left(\frac{t}{T} - 1\right), & \frac{3T}{4} \leq t < T; \end{cases} \quad (26)$$

$$g(t) = 2\frac{t}{T} - 1. \quad (2b)$$

В выражениях (2a)—(2b) T — период модуляции.

Воспользовавшись формулой для вычисления полезного сигнала радиолокатора непрерывного излучения с частотной модуляцией [1]

$$u_S(t) = U_S \cos\left(2\pi \int_{t-\tau}^t f(t') dt'\right), \quad (3)$$

где τ — время задержки принимаемого сигнала, U_S — амплитуда полезного сигнала, получим амплитудные спектры полезного сигнала для синусоидальной, треугольной и пилообразной формы модулирующего сигнала, соответственно:

$$\sigma_m = U_S \begin{cases} J_0(\pi B\tau) \cos(2\pi f_0\tau), & m = 0; \\ 2|J_m(\pi B\tau) \sin(2\pi f_0\tau)|, & m = 1,3,5 \dots; \\ 2|J_m(\pi B\tau) \cos(2\pi f_0\tau)|, & m = 2,4,6 \dots; \end{cases} \quad (4a)$$

$$\sigma_m = U_S \begin{cases} Q_0\left(2B\tau, \frac{\tau}{T}\right) \cos(2\pi f_0\tau), & m = 0; \\ 2\left|Q_m\left(2B\tau, \frac{\tau}{T}\right) \sin(2\pi f_0\tau)\right|, & m = 1,3,5 \dots; \\ 2\left|Q_m\left(2B\tau, \frac{\tau}{T}\right) \cos(2\pi f_0\tau)\right|, & m = 2,4,6 \dots; \end{cases} \quad (4b)$$

$$\sigma_m = U_S R_m\left(B\tau, \frac{\tau}{T}, f_0\tau\right). \quad (4b)$$

Выражение (4a) получено в предположении $\frac{\pi\tau}{T} \ll 1$, $J_m(x)$ — функции Бесселя первого рода. Выражение (4b) получено в предположении $\frac{2\tau}{T} \ll 1$,

$$Q_0(x, y) = \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi x}{2} (1 - 2y) \right] + 2 \sqrt{\frac{y}{x}} \left(C(\sqrt{xy}) \cos \left[\frac{\pi x}{2} (1 - y) \right] + S(\sqrt{xy}) \sin \left[\frac{\pi x}{2} (1 - y) \right] \right), \quad (46')$$

$$Q_m(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{2} (1 - 2y)(x - m) \right] - \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{2} (1 - 2y)(x + m) \right] \right\} + (-1)^{\frac{m+1}{2}} \sqrt{\frac{y}{x}} \left(- \left[C \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x - m) \right) + C \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x + m) \right) \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(x(1 - y) + \frac{y}{x} m^2 \right) \right] + \left[S \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x - m) \right) + S \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x + m) \right) \right] \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(x(1 - y) + \frac{y}{x} m^2 \right) \right] \right), m = 1, 3, 5 \dots; \quad (46'')$$

$$Q_m(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{2} (1 - 2y)(x - m) \right] + \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{2} (1 - 2y)(x + m) \right] \right\} + (-1)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\frac{y}{x}} \left(\left[C \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x - m) \right) + C \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x + m) \right) \right] \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(x(1 - y) + \frac{y}{x} m^2 \right) \right] + \left[S \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x - m) \right) + S \left(\sqrt{\frac{y}{x}} (x + m) \right) \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(x(1 - y) + \frac{y}{x} m^2 \right) \right] \right), m = 2, 4, 6 \dots; \quad (46''')$$

$C(x)$, $S(x)$ — интегралы Френеля. Выражение (4в) получено в предположении $\frac{\tau}{T} \ll 1$ и $\frac{|m|}{BT} \ll 1$,

$$R_0(x, y, z) = \operatorname{sinc}[\pi x(1 - y)] \cos(2\pi z), \quad (4в')$$

$$R_m(x, y, z) = \{ \operatorname{sinc}^2[\pi(x - m)(1 - y)] + \operatorname{sinc}^2[\pi(x + m)(1 - y)] + 2 \operatorname{sinc}[\pi(x - m)(1 - y)] \operatorname{sinc}[\pi(x + m)(1 - y)] \cos(4\pi z) \}^{\frac{1}{2}}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (4в'')$$

При перестройке частоты происходит нежелательное изменение мощности опорного сигнала, что приводит к тому, что на выходе смесительного элемента помимо постоянной составляющей протектированного опорного сигнала появляется сигнал с периодом T и его гармоники. Будем считать, что в полосе модуляции сверхвысокочастотного сигнала величина паразитного сигнала, обусловленного детектированием опорного сигнала, линейно зависит от частоты:

$$u_N(t) = U_{N0} + K \frac{B}{2} g(t), \quad (5)$$

где U_{N0} — выходное напряжение при детектировании сигнала на центральной частоте f_0 , K — коэффициент линейной связи. Таким образом, амплитудные спектры

паразитных сигналов ν_m совпадают с амплитудными спектрами рассматриваемых форм модулирующего сигнала $g(t)$ с амплитудой $K \frac{B}{2}$ и дополнительной постоянной составляющей U_{N0} .

Частота m -ой гармоники спектра выходного сигнала даётся выражением $f_m = \frac{m}{T}$.

3. Сравнение спектров выходного сигнала при различных формах модулирующего сигнала

На рисунке 1 приведены амплитудные спектры полезного сигнала для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм модулирующего сигнала, которые даются выражениями (4а)—(4в). Выбраны следующие значения параметров: $f_0 = 100$ ГГц, $T = 10$ мс, $B = 1$ ГГц, $\tau = 100.001$ нс, $U_s = 10$ мВ. Из графика видно, что при использовании синусоидальной формы модулирующего сигнала нет ярко выраженного пика в спектре полезного сигнала, что делает практически невозможным определение расстояния до объекта. Наиболее предпочтительным с точки зрения формы спектра полезного сигнала является использование пилообразного сигнала, который по сравнению с треугольным сигналом даёт более узкий пик. Однако, как показывает нижеприведённый анализ спектра паразитного сигнала, пилообразный сигнал имеет и существенный недостаток.

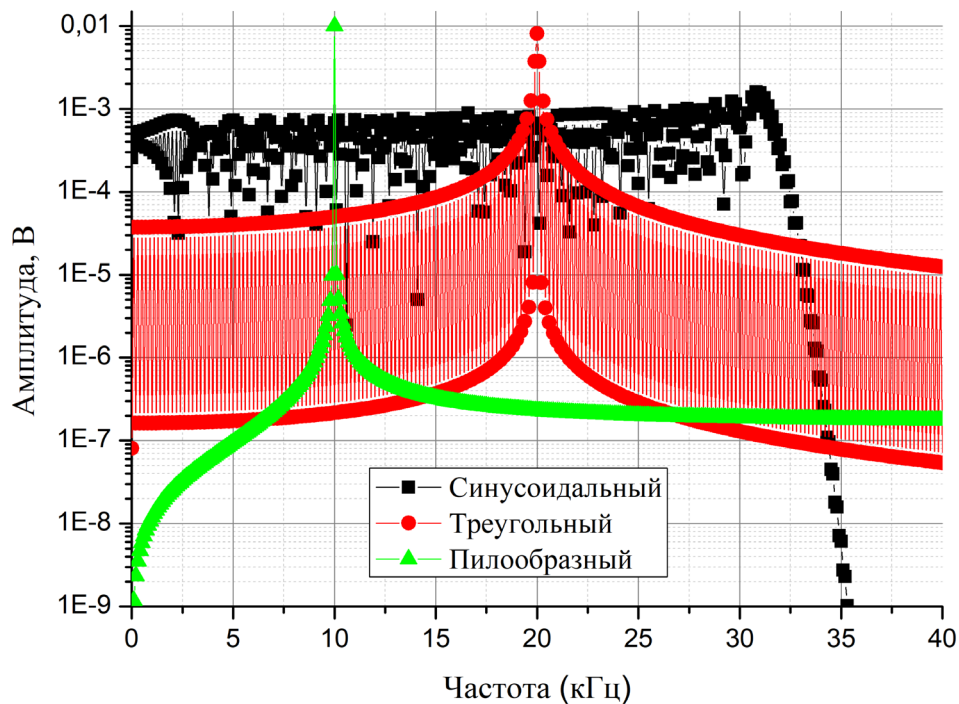


Рисунок 1. Амплитудные спектры полезного сигнала для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм модулирующего сигнала.

На рисунке 2 представлены спектры паразитного сигнала для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм модулирующего сигнала. Использовались те же значения параметров T и B , что и при построении спектров полезного сигнала; $K = 0.1$ В/ГГц. Из графика видно, что спектр паразитного сигнала для пилообразной формы модулирующего сигнала спадает медленнее ($\nu_m \sim \frac{1}{f_m}$), чем спектр для треугольной формы модулирующего сигнала ($\nu_m \sim \frac{1}{f_m^2}$), что приводит к большему на порядки уровню паразитных составляющих спектра в рабочем диапазоне частот $f_m \gg \frac{1}{T}$.

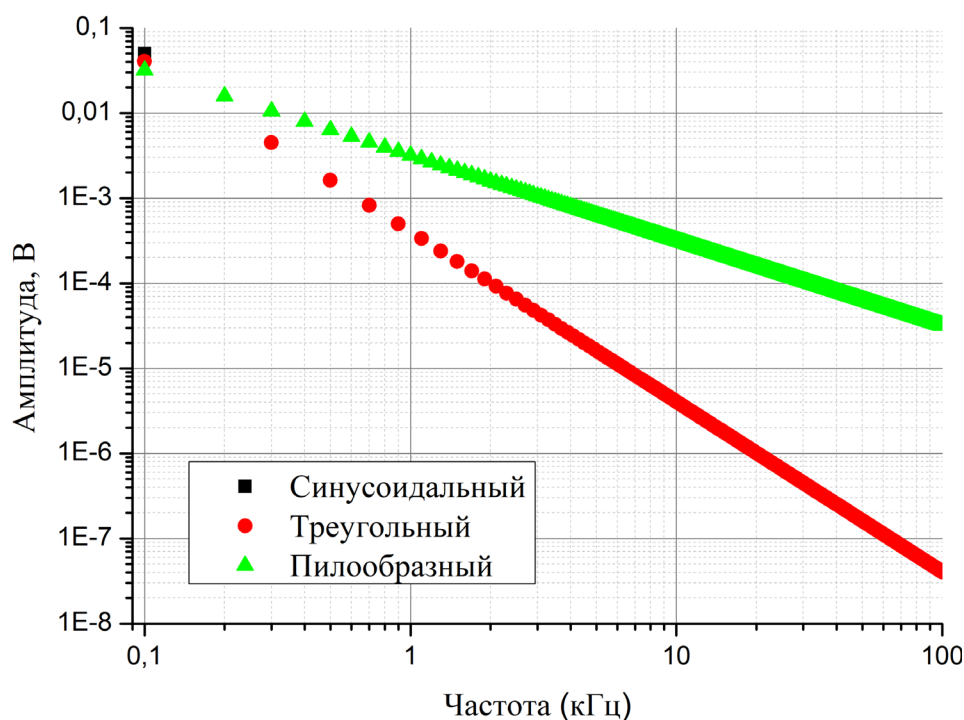


Рисунок 2. Амплитудные спектры паразитного сигнала для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм модулирующего сигнала.

4. Заключение

В работе проанализировано влияние выбора формы модулирующего сигнала на спектр выходного сигнала радиолокатора непрерывного излучения с частотной модуляцией. Несмотря на то, что спектр полезного выходного сигнала при использовании пилообразной формы модулирующего сигнала имеет более узкий пик, спектр паразитного сигнала, вызванного нежелательной амплитудной модуляцией опорного сигнала, для пилообразной формы модулирующего сигнала имеет на порядки большие значения, чем спектр для треугольной формы модулирующего сигнала. Данный факт следует учитывать при выборе формы модулирующего сигнала радиолокатора.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00129)**.

Список литературы

1. Komarov I., Smolskiy S. Fundamentals of short-range FM radar. – Artech, 2003.
2. Townley A. et al. A 94-GHz 4TX–4RX phased-array FMCW radar transceiver with antenna-in-package // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2017. – Т. 52. – №. 5. – С. 1245–1259.
3. Kueppers S. et al. A compact 24 × 24 channel MIMO FMCW radar system using a substrate integrated waveguide-based reference distribution backplane // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Т. 68. – №. 6. – С. 2124–2133.
4. Korolyov S. et al. Millimeter-wave imaging system based on direct-conversion focal-plane array receiver // Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 19. – С. 7132.