

ОСЛАБЛЕНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И СИСТЕМАХ СВЯЗИ

ПЕТР ФЛОРИН, инженер

В статье рассматривается влияние фазового шума на работу радиолокационных систем и систем связи, а также описываются способы его ослабления.

Фазовый шум является одним из наиболее важных факторов в сложных радиолокационных системах и системах связи. Это обусловлено, в первую очередь тем, что именно он определяет захват цели в радиолокационных системах, а также целостность спектра в системах связи.

Фазовый шум обычно используется в качестве меры стабильности частоты генератора. Этот шум имеет иную природу, чем общий фоновый шум любой электронной системы, который также называют тепловым. Тепловой шум равен произведению kTB , где k – постоянная Больцмана; V – полоса пропускания и T – температура. Фазовый шум является вторичным эффектом, напрямую связанным с топологией и конструкцией генератора.

На рисунке 1 представлена зависимость выходной мощности от частоты генератора. Голубым цветом показана идеальная зависимость, когда выходная мощность вырабатывается только на одной фиксированной частоте. Серой линией показан выходной сигнал генератора с фазовым шумом, который проявляется как мощность, распределенная по спектру частот, очень близко к желаемому выходу. Эти боковые частоты всегда присутствуют в спектре из-за теплового шума внутри активных устройств генератора.

Амплитуда боковых частот зависит от качества генератора и измеряется в дБн/Гц на частоте смещения от желаемого сигнала (несущей).

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА

Фазовый шум влияет на работу многих СВЧ-систем. В этой статье мы ограничимся рассмотрением только двух типов: приемников прямого преобразования и радиолокационных систем.

Приемники прямого преобразования применяются в системах СВЧ-связи. Одним из преимуществ прямого понижающего преобразования является простота схемы, которая,

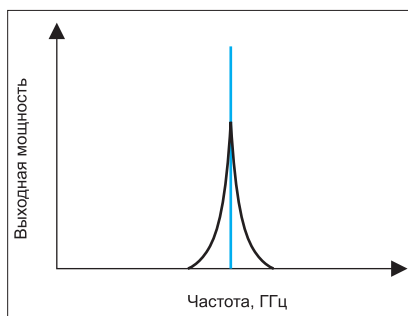


Рис. 1. Спектр идеального сигнала (голубым) и сигнала с фазовым шумом (серым)

по сути, состоит из одиночного смесителя и гетеродина, преобразующего входной РЧ-сигнал в основной тон (очень низкую частоту). Затем сигнал основного тона поступает в АЦП для обработки. Недостатком схемы является то, что при прямом понижающем преобразовании частота входного РЧ-сигнала может оказаться близкой к частоте гетеродина, и процесс преобразования становится чувствитель-

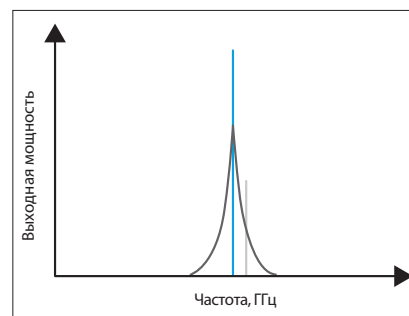


Рис. 2. Графическое представление идеального сигнала гетеродина (голубым) и сигнала гетеродина с фазовым шумом (серым), а также радиосигнал до преобразования в сигнал основного тона (светло-серым)

ным к фазовому шуму, особенно если амплитуда сигнала мала.

В радиолокационных системах проблема имеет похожую природу. Радиолокационная система передает импульс известной частоты, затем измеряет сдвиг частот на обратном импульсе. Сдвиг частот обусловлен эффектом Доплера, когда источник сигнала движется.

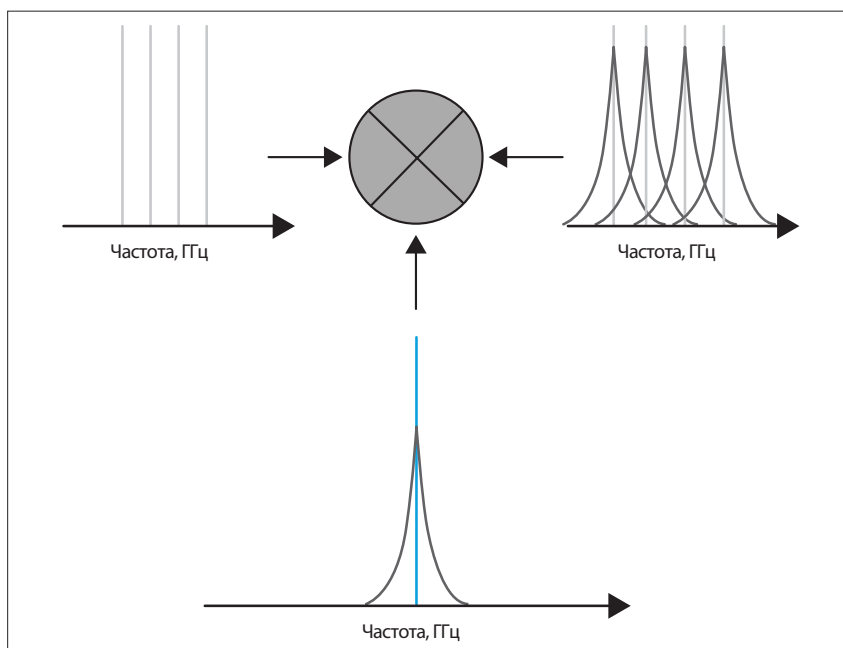


Рис. 3. Принцип появления искажений в OFDM-системах: идеальный сигнал гетеродина (голубым), сигнал гетеродина с фазовым шумом (серым), радиосигнал (светло-серым)

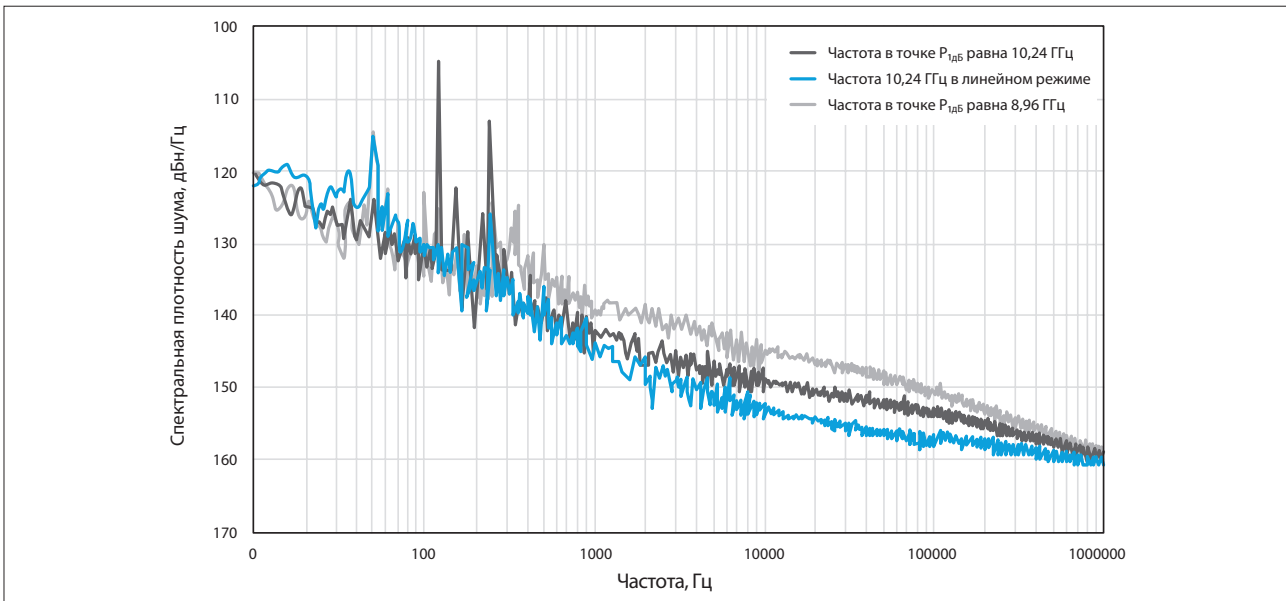


Рис. 4. Фазовый шум малошумящего усилителя CMD167

Объекты, которые движутся медленно, генерируют обратный сигнал с частотой, очень близкой к частоте переданного импульса, и если поперечное сечение объекта мало, уровень мощности принятого сигнала также очень низкий. Далее обратный сигнал преобразуется в основной тон, чтобы восстановить информацию о скорости. Фазовый шум может исказить оценку.

Наглядно суть проблемы показана на рисунке 2. Уровень мощности радиосигнала, который требуется преобразовать, сопоставим с фазовым шумом сигнала гетеродина, из-за чего невозможно восстановить информацию, содержащуюся в сигнале основного тона. Таким образом, уменьшение фазового шума приводит к увеличению чувствительности приемника.

На рисунке 3 приведен пример негативного влияния фазового шума на преобразование сигнала. Если фазовый шум гетеродина слишком высокий, он формирует смежные каналы, которые нарушают целостность полезной информации.

УСИЛИТЕЛИ И ФАЗОВЫЙ ШУМ

Одним из наиболее очевидных факторов, которые приводят к ограничению фазового шума, является выбор генератора. Можно потратить время и деньги на разработку или поиск малошумящей модели. Однако большинство генераторов не вырабатывает достаточно мощный сигнал.

Допустим, что выходной сигнал генератора 5 дБм следует усилить до 15–17 дБм, чтобы использовать его на входе гетеродина в смесителе. Влияет ли усилитель в этом случае на фазовый шум сигнала гетеродина?

В идеальном случае нет, поскольку усилитель только увеличивает мощность сигнала гетеродина и боковых частот на одинаковую величину. Однако на практике СВЧ-усилители добавляют собственный шум в сигнал, и возникают сложности.

Все электронные устройства вносят фликкер-шум (шум $1/f$, «розовый» шум) в спектр входного сигнала. Он затухает обратно пропорционально увеличению частоты смещения. На рисунке 4 показана зависимость фазового шума малошумящего усилителя CMD167 с полосой 10–17 ГГц от частоты смещения. Для наглядности фазовый шум входного сигнала на этом рисунке не представлен – показан шум, вносимый усилителем.

Видно, что фазовый шум спадает линейно на логарифмической шкале, что характерно для $1/f$. Если уровень фликкер-шума выше фазового шума входного сигнала, шум усилителя преобладает в выходном шумовом спектре. В рассматриваемом примере это значит, что малый шум генератора замещается более сильным фазовым шумом усилителя, что сводит на нет преимущества использования малошумящего генератора (см. рис. 5).

Для ослабления фазового шума необходимо понимать причины его возникновения. Шум $1/f$ обусловлен случайным и тепловым движением заряда в канале активного устройства. Усилитель CMD167, например, изготовлен на основе арсенида галлия по технологии pHEMT (псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов) с длиной затвора 0,13 мкм.

Полевые транзисторы, изготовленные по той же технологии, имеют высокий шум из-за высокой подвижности электронов. Биполярные транзисторы на GaAs, напротив, имеют низкую подвижность электронов, что приводит к значительно меньшему фликкер-шуму.

Таким образом, одним из способов уменьшения фазового шума является использование биполярных гетеротранзисторов на арсениде галлия.

Компания Qorvo представила новое семейство усилителей с малым фазовым шумом на биполярных гетеротранзисторах на арсениде галлия с рабочей полосой 6–40 ГГц. В таблице 1 представлены их характеристики.

На рисунке 6 показана зависимость фазового шума от частоты смещения для усилителя CMD245, выполненного в 4-мм корпусе QFN. При срав-

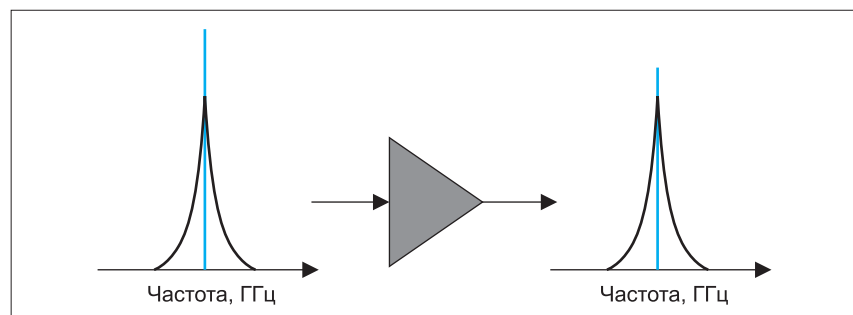


Рис. 5. Увеличение шума, обусловленное усилителем

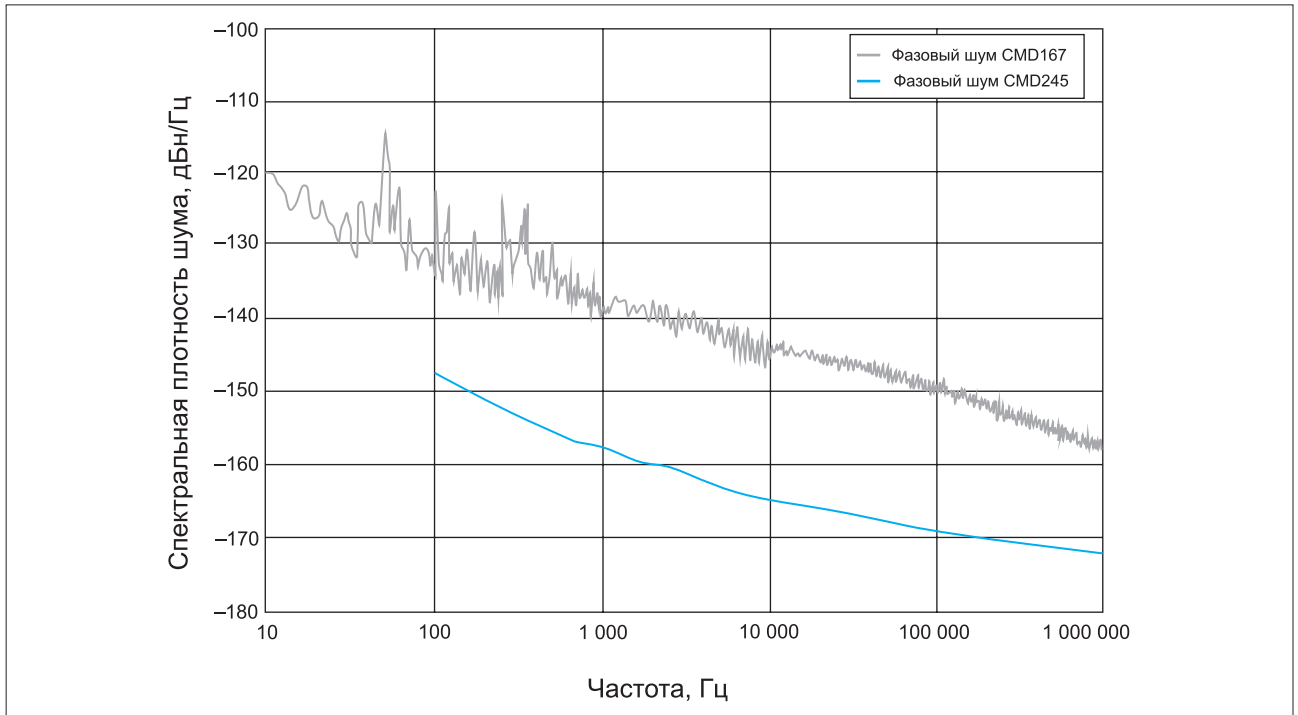


Рис. 6. Сравнение фазового шума усилителей CMD245C4 и CMD167

Таблица 1. Характеристики усилителей Qorvo с низким фазовым шумом

Модель	Частота, ГГц	Мощность насыщения, дБм	Фазовый шум, дБн/Гц при смещении 10 кГц
CMD245	6–18	20–22	-165
CMD246	8–22	18–20	-165
CMD247	30–40	15	менее -160

нении с малошумящим усилителем CMD167 на транзисторах с высокой подвижностью электронов видно, что фазовый шум CMD245C4 на 15–20 дБ меньше.

ДРУГИЕ КОМПОНЕНТЫ И ФАЗОВЫЙ ШУМ

Другие компоненты, в т. ч. умножители частот, могут также вносить вклад в фазовый шум. Во многих СВЧ-системах используется генератор меньшей частоты, и его частота умножается для получения заданной.

Для генерации требуемой выходной частоты зачастую при умножении используют усилитель, в выходной сигнал которого добавлены гармонические составляющие. К сожалению, при таком подходе фазовый шум усилителя попадает в умноженный сигнал, что ухудшает фазовый шум исходного генератора.

Второй подход заключается в использовании пассивного умножения, при котором минимальный фазовый шум вносится в сигнал умножителя, или т. н. удвоителя. Компания Qorvo имеет линию пассивных умножителей частот на биполярных гетеротранзисторах, которые не вносят фазовый шум во входной сигнал. В таблице 2 приведены их характеристики. ⇨

Таблица 2. ИС пассивных умножителей Qorvo

Модель	Выходная частота, ГГц
CMD225	8–16
CMD226	14–22
CMD227	16–30