

# Широкополосный СВЧ-аттенюатор, выполненный по мостовой структуре

В. Репин, к. т. н.<sup>1</sup>, И. Мухин, к. т. н.<sup>1</sup>, М. Дроздецкий<sup>1</sup>, Г. Алексеев<sup>1</sup>

УДК 621.37 | ВАК 05.27.01

В статье представлена оригинальная структура СВЧ-аттенюатора, изготовленного по КМОП КНИ-технологии. Особенность данной структуры – возможность непрерывной регулировки ослабления благодаря использованию в качестве переменных импедансов сопротивления канала полевых транзисторов. Решение отличается высоким уровнем линейности со значением однодецибелной компрессии  $P_{1dB}$  около 10 дБм. Частотный диапазон эффективного ослабления аттенюатора 1–12 ГГц при коэффициенте ослабления не менее 32 дБ, в более узкой полосе частот ослабление превышает 50 дБ.

Одна из основных областей применения аттенюаторов – регулировка амплитуды сигнала в приеме-передающих устройствах. По сравнению с другим распространенным решением, усилителями с переменным коэффициентом усиления (КУ), аттенюаторы, как правило, отличаются более высокой линейностью, меньшей потребляемой мощностью и более широким частотным диапазоном [1]. Чаще всего применяются многокаскадные дискретные аттенюаторы различных типов, например, распределенные аттенюаторы [2], переключаемые П- и Т-образные резистивные блоки [1, 3]. Существуют также аттенюаторы с непрерывно меняющимся ослаблением [4, 5].

К основным характеристикам пассивного аттенюатора относятся вносимые потери, частотный диапазон, диапазон регулировки ослабления и величина дискрета ослабления (при ступенчатой регулировке), линейность и величина вносимого фазового сдвига. Одновременное обеспечение всех заданных характеристик представляет собой сложную инженерную задачу. В данной работе рассматривается пассивный аттенюатор с относительно низкими вносимыми потерями, большим коэффициентом ослабления в широкой полосе частот и высокой линейностью.

## РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АТТЕНЮАТОРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ОСЛАБЛЕНИЕМ

Пассивный дифференциальный аттенюатор состоит из двух каскадов. Назначение первого – расширение диапазона регулировки и динамического диапазона. Для этого каскада характерны два состояния: пропускание сигнала и фиксированное ослабление на заданную величину (~18 дБ). Второй каскад отличается

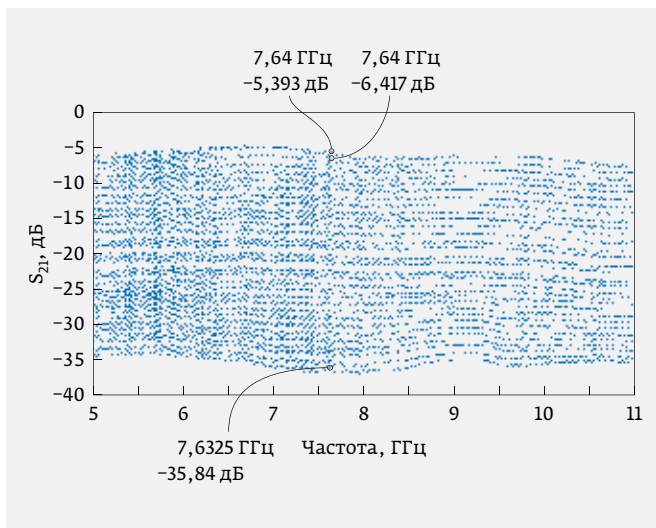
непрерывным ослаблением. Разрядность аттенюатора, в случае управления через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), зависит от разрядности внешнего ЦАП, управляющего вторым каскадом. Включение первого каскада позволяет ступенчато увеличить диапазон регулировки на 18 дБ.

Оба каскада представляют собой схему моста Уитстона [6], в плечи которого включены резисторы и МОП-транзисторы в роли переменных импедансов. Пару транзисторов, включенных между входом и выходом одной полярности (M1, M6 на рис. 1), назовем проходными, а транзисторы, включенные между входом одной и выходом другой полярности (M2, M3 на рис. 1), – компенсирующими. Дифференциальный сигнал подается и снимается с диагоналей моста. Когда мост сбалансирован, достигается максимальный уровень ослабления. Состояние минимального ослабления достигается при минимальном значении импеданса проходных транзисторов (открытый транзистор) и, соответственно, максимального импеданса компенсирующих (закрытый транзистор). Номиналы резисторов подбираются так, чтобы обеспечить заданное ослабление. Транзисторы M2, M4 (см. рис. 1) необходимы для корректировки фазовых характеристик в двух состояниях первого каскада. Более подробно данный принцип ослабления описан в [7].

Во втором каскаде, функционирующем аналогично первому (рис. 2), реализовано плавное изменение импедансов транзисторов и, соответственно, непрерывное изменение величины ослабления. Резисторы R31 и R32 (см. рис. 2), включенные параллельно проходным транзисторам, ограничивают величину максимального ослабления, что улучшает фазовую характеристику аттенюатора [7] и ее линейность. Для обеспечения оптимальной управляющей характеристики используются дифференциальные каскады на п- и р-МОП-транзисторах.

<sup>1</sup> АО «НИИМА «Прогресс».



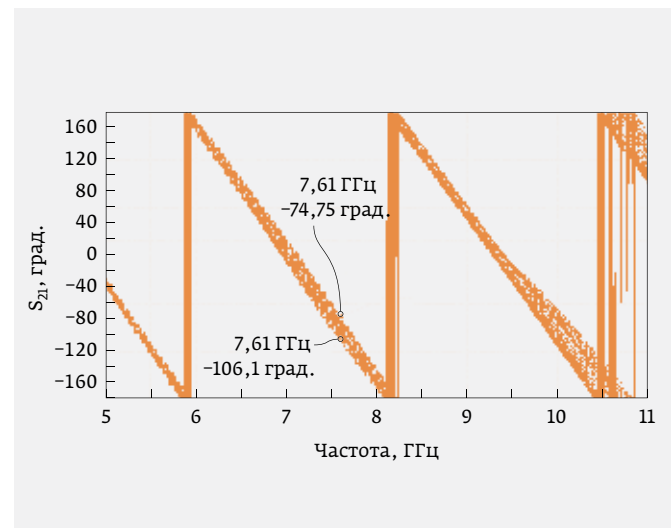


**Рис. 3.** Амплитудно-частотная передаточная характеристика аттенюатора в 32 состояниях в полосе рабочих частот пассивных балунов

вносимые потери составляют 3,5 дБ (1,5 дБ потери оснстки).

Результаты измерений паразитной фазовой модуляции аттенюатора в 32 состояниях показаны на рис. 4. Максимальный разброс фаз составляет примерно 30°. На частотах выше 9 ГГц величина разброса фаз выше, что может быть связано, в частности, с влиянием оснстки.

Проведено сравнение параметров разработанного аттенюатора с опубликованными в литературе



**Рис. 4.** Фазово-частотная передаточная характеристика аттенюатора в 32 состояниях в полосе рабочих частот пассивных балунов

результатами по известным структурам аттенюаторов (табл. 1). Так как предложенная структура является оригинальной, то для сравнения выбраны устройства с наиболее близкими параметрами других вариантов реализации.

\*\*\*

В данной работе представлен дифференциальный пассивный аттенюатор с непрерывным ослаблением.

#### Сравнение основных параметров аттенюаторов из разных литературных источников

Источник	[3]	[8]	[9]	[1]	Данная работа
Частотный диапазон, ГГц	8–12	3,2–9,2	0,1–4,5	7,7–10,8	1–12**
Технология	0,18 мкм КМОП	0,13 мкм КМОП	0,25 мкм SiGe БиКМОП	0,25 мкм SiGe БиКМОП	0,2 мкм КНИ
Диапазон ослабления, дБ	31,5	16*	31	16,51	36 дБ (до 50 дБ на 8 ГГц)
Количество разрядов	6	4	5	7	Непрерывный или дискретный с разрядностью ЦАП
Вносимые потери, дБ	<11,3	<5*	5,4	<12	<7
$P_{1дБ}$ , дБм	13	НД	14	12,5	>10,8*

\* Результаты моделирования.

\*\* Ограничение снизу связано с частотной характеристикой балуна, сверху – со значительным возрастанием фазовой модуляции.

Используемый принцип ослабления запатентован [10] и подробно описан авторами в [7]. Для аттенюатора характерны низкие вносимые потери, приемлемые значения фазовой модуляции при большом диапазоне регулировки ослабления в широкой полосе частот. Непрерывный характер изменения ослабления позволяет получать произвольное количество дискретов и их величину при использовании ЦАП требуемой разрядности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Davulcu M., Caliskan C., Kalyoncu I.** et. al. 7-Bit SiGe-BiCMOS Step Attenuator for X-Band Phased-Array RADAR Applications // IEEE MWCL. 2016. Aug. V. 26. No. 8. P. 598–600.
2. **Min B. W., Rebeiz G. M.** A 10–50 GHz CMOS distributed step attenuator with low loss and low phase imbalance // IEEE J. Solid-State Circuits. 2007. Nov. V. 42. No. 11. P. 2547–2554.
3. **Ku B., Hong S.** 6-bit CMOS digital attenuators with low phase variations for X-band phased-array systems // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2010. Jul. V. 58. No. 7. P. 1651–1663.
4. **Тео Т. Н.** Low-Power Digitally Controlled CMOS Source Follower Variable Attenuator // IEEE ISCAS2007. New Orleans. LA. 2007. 27–30 May.
5. **Балыко А. К., Зуева О. С., Холодов Д. В., Вахламова М. Ю.** Аттенюаторы на ПТШ с плавной регулировкой ослабления // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2013. № 1 (516). С. 72–74.
6. **Лебедев П. Ф.** Электрические мосты теоретической электротехники // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 6 (43). С. 38–43.
7. **Репин В. В., Мухин И. И., Дроздецкий М. Г., Алексеев Г. В.** Исследование методов линеаризации КМОП-микросхем и разработка высоколинейного аттенюатора СВЧ-диапазона // Сборник трудов 26-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). 2016. Т. 2. С. 233–239.
8. **Milicevic M., Milinkovic B., Radic J., Djuric R.** Digitally controlled attenuator // 24th Telecommunications forum TEFLOR2016. Serbia. Belgrade. 2016. Nov. 22–23.
9. **Dobush I. M., Sheyerman F. I., Babak L. I. et. al.** Design and Measurements of 0,1–4,5 GHz SiGe BiCMOS MMIC Digital Step Attenuator // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk. 2016. P. 94–96.
10. **Репин В. В., Мухин И. И., Алексеев Г. В., Дроздецкий М. Г.** Интегральный аттенюатор. Патент № 2642538. Опубликовано 25.01.2018. Бюл. №3. 2018.