

С. И. Артамонов – магистрант кафедры микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения
Д. К. Шелест (д-р техн. наук, проф.) – научный руководитель

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ШУМА ДВУХКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20°K

В статье [1] рассматривается вопрос считывания информации с матричного фотоприемного устройства при лабораторных исследованиях характеристик ФПУ. Анализ вариантов показал, что наиболее предпочтительным является метод считывания с коммутацией сигналов. В данной статье рассматривается расчет спектральной плотности шума двухкаскадного усилителя коммутированного сигнала, размещаемого в охлаждаемой зоне фотоприемного устройства.

Модернизации инфракрасного фотоприемного устройства (ИКФПУ), за счет внесения в его охлаждаемую зону схемы аналоговой коммутации вызывает необходимость в создании макетной платы для отработки схемы коммутации, и последующей обработки коммутируемой информации. Помимо микросхемы коммутации на этой плате должна располагаться схема усиления.

На рисунке 1 приведена часть схемы электрической принципиальной платы коммутации и усиления, а именно, схема двухкаскадного усилителя, построенного на микросхемах OPA211AID.

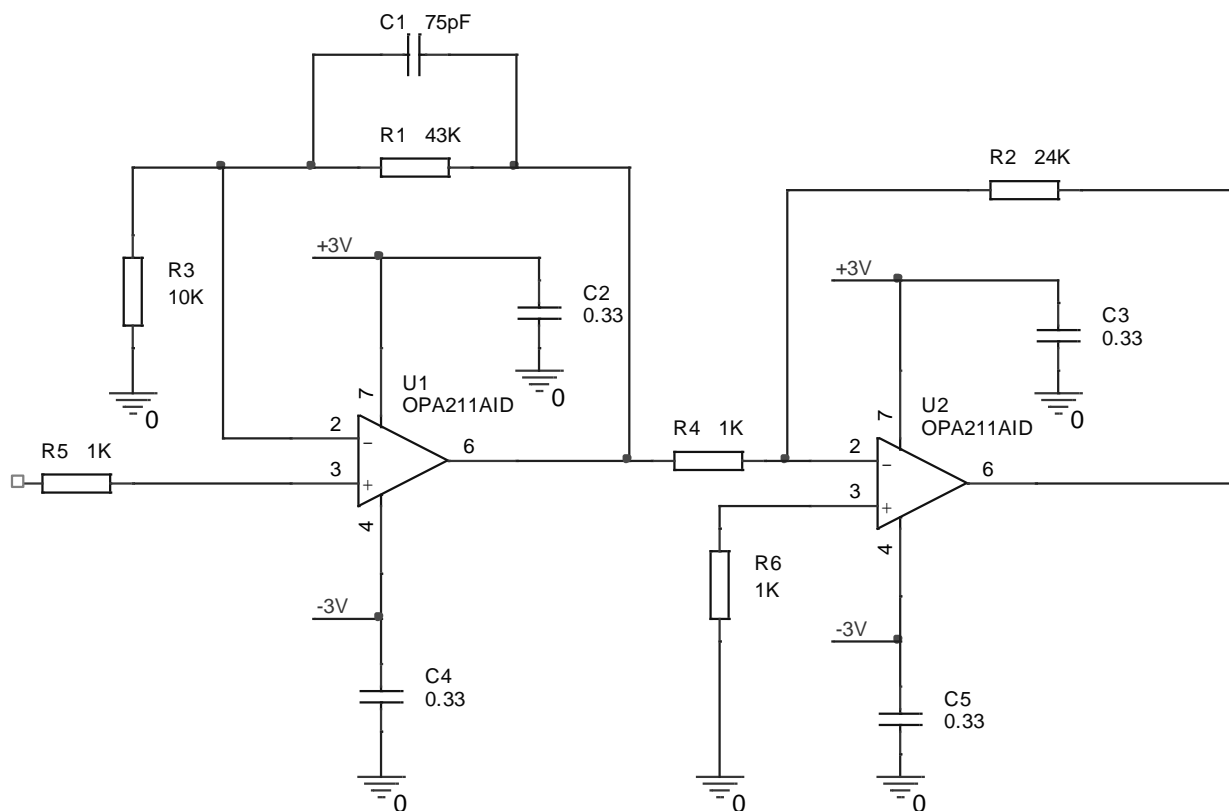


Рис. 1. Схема двухкаскадного усилителя коммутированного сигнала

Первый каскад усилителя представляет собой неинвертирующее включение ОУ, с фильтром низких частот. Второй каскад усилителя выполнен на основе инвертирующей схемы включения ОУ.

Резистор R5 – защитный резистор. Операционный усилитель U1 включен как неинвертирующий усилитель. Это сделано для того, чтобы коэффициент усиления не зависел от сопротивления цепи на положительном входе ОУ. Однако при больших коэффициентах усиления такая схема усилителя работает нестабильно. Коэффициент усиления вычисляется по формуле

$$K = 1 + \frac{R_1}{R_3}$$

Таким образом коэффициент усиления в данной схеме равен:

$$K_n = 1 + \frac{43 \times 10^3}{10 \times 10^3} = 5.3$$

Конденсатор С1 в цепи ООС служит как фильтр низких частот, его частота среза вычисляется по формуле:

$$F = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

Для данной схемы, исходя из параметров сигнала, выбрана частота среза 50кГц.

Второй усилитель, U2 включен как инвертирующий усилитель, и служит для окончательного усиления сигнала. Его коэффициент усиления вычисляется по формуле:

$$K_i = \frac{R_2}{R_4}$$

Таким образом коэффициент усиления второго каскада равен 24, а общий коэффициент усиления равен: $5 \cdot 24 = 120$.

Согласно [2] эквивалентная схема операционного усилителя выглядит, как показано на рисунке 2.

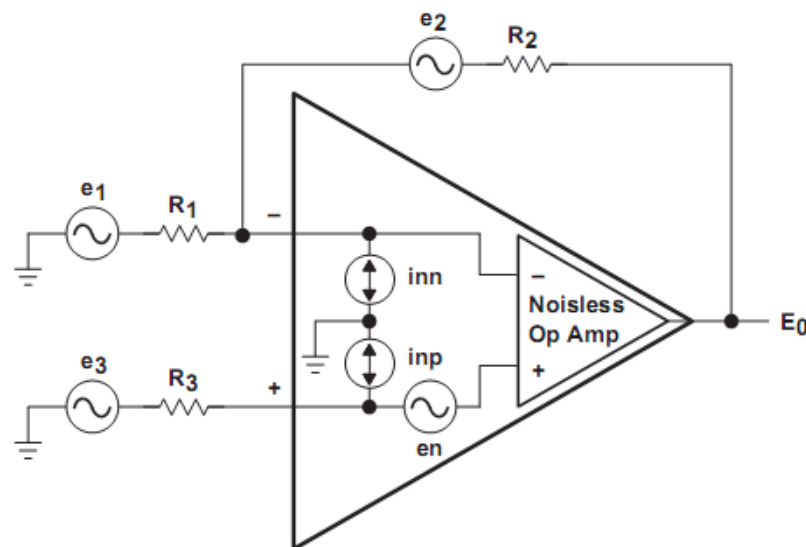


Рис. 2. Эквивалентная схема операционного усилителя при инвертирующем и неинвертирующем включении

На схеме R1, R2, R3 – идеальные нешумящие резисторы, e1, e2, e3 – источники шума плотность шума которых вычисляется по формуле $e_1 = \sqrt{4kTR_1}$, inn, inp, en – внутренние источники шума операционного усилителя [3].

Согласно [2] и [3] плотность шума неинвертирующего усилителя, изображенного на рисунке 1, вычисляется по формуле:

$$E_{on}^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right)^2 e_n^2 + e_3^2 + e_1^2 + (i_n R_1)^2 + e_5^2 + (i_n R_5)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right)^2$$

где

$$e_5 = \sqrt{4kTR_5} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_5$$

$$e_3 = \sqrt{4kTR_3} \times \left(\frac{R_2}{R_3}\right) = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_3$$

$$e_1 = \sqrt{4kTR_1} = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_1$$

Для ОРА211 внутренние источники шума $e_n = 1.1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, $i_n = 1.7 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Вычислим тепловой шум сопротивления источника и резисторов: $R_5 = 2\text{кОм}$, $R_3 = 10\text{кОм}$, $R_1 = 43\text{кОм}$.

$$e_5 = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 2 \times 10^3} \times \left(1 + \frac{43 \times 10^3}{10^4}\right) = 8 \text{ нВ}$$

$$e_3 = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 10^4} \times \left(\frac{43 \times 10^3}{10^4}\right) = 14 \text{ нВ}$$

$$e_1 = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 43 \times 10^3} = 7 \text{ нВ}$$

Вычислим плотность шума неинвертирующего усилителя:

$$E_{0n}^2 = \left(1 + \frac{43 \times 10^3}{10^4}\right)^2 \times (1,1 \times 10^{-9})^2 + (14 \times 10^{-9})^2 + (7 \times 10^{-9})^2 + (1,7 \times 10^{-12} \times 43 \times 10^3)^2 +$$

$$(8 \times 10^{-9})^2 + (1,7 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3)^2 \times \left(1 + \frac{43 \times 10^3}{10^4}\right)^2 = 5,3^2 \times 1,1^2 \times 10^{-18} + 14^2 \times 10^{-18} + 7^2 \times 10^{-18} +$$

$$71,4^2 \times 10^{-18} + 8^2 \times 10^{-18} + 3,4^2 \times 10^{-18} \times 5,3^2 = 32,7184 \times 10^{-18} + 196 \times 10^{-18} + 49 \times 10^{-18} +$$

$$5097,96 \times 10^{-18} + 64 \times 10^{-18} + 39,65 \times 10^{-18} = 60,16 \times 10^{-18} \text{ В}^2/\text{Гц}$$

$$E_{0n} = 78 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$$

Согласно [2] и [3] плотность шума инвертирующего усилителя, изображенного на рисунке 1, вычисляется по формуле:

$$E_{0i}^2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_4 + R_s}\right)^2 e_n^2 + e_4^2 + e_2^2 + (i_n R_2)^2 + e_s^2,$$

где

$$e_s = \sqrt{4kTR_s} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_4 + R_s}\right) = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_s;$$

$$e_1 = \sqrt{4kTR_4} \times \left(\frac{R_2}{R_4 + R_s}\right) = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_1;$$

$$e_2 = \sqrt{4kTR_2} = \text{источник шума, эквивалентного тепловому шуму } R_2.$$

Вычислим тепловой шум сопротивления источника и резисторов: $R_s = 50 \text{ Ом}$, $R_4 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 24 \text{ кОм}$.

$$e_s = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 5} \times \left(1 + \frac{24 \times 10^3}{1005}\right) = 2 \text{ нВ};$$

$$e_4 = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 10^3} \times \left(\frac{24 \times 10^3}{1005}\right) = 25 \text{ нВ};$$

$$e_2 = \sqrt{4 \times 1,380 \times 10^{-23} \times 20 \times 24 \times 10^3} = 5 \text{ нВ}.$$

Вычислим плотность шума инвертирующего усилителя:

$$E_{0i}^2 = \left(1 + \frac{24 \times 10^3}{1005}\right)^2 \times 1,1^2 \times 10^{-18} + 25^2 \times 10^{-18} + 5^2 \times 10^{-18} + (1,7 \times 10^{-12} \times 24 \times 10^3)^2 + 2^2 \times 10^{-18}$$

$$= 619 \times 1,1^2 \times 10^{-18} + 25^2 \times 10^{-18} + 5^2 \times 10^{-18} + 40,8^2 \times 10^{-18} + 2^2 \times 10^{-18} =$$

$$3067,63 \times 10^{-18} \text{ В}^2/\text{Гц};$$

$$E_{0i} = 55 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$$

Согласно [2] общую спектральную плотность шума двухкаскадного усилителя, изображенного на рисунке 1, вычислим по формуле:

$$E_0 = E_{0n} \times k_i + E_{0i} = 77 \times 24 + 55 = 1903 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} = 1,9 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$$

Согласно приведенным расчетам плотность шума двухкаскадного усилителя составила $1,9 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Собственный шум ФПУ составляет $0,5 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, после усиления эта величина составит $60 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Шум усилителя составляет 3.2% от собственного шума ФПУ. Таким образом, расчеты показали, что двухкаскадный усилитель не вносит существенных искажений в сигнал от схемы считывания информации с ФПУ.

Библиографический список

1. Артамонов С. И. Программно-аппаратная часть стенда для измерения характеристик фото-приемных устройств / С. И. Артамонов // Шестьдесят четвертая международная студенческая научная конференция ГУАП ч.1 Технические науки: сб. докладов СПб., 2012. С. 87-90.
2. Texas Instruments Incorporated. Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ddd101.pdf>
3. Texas Instruments Incorporated. OPA211 Datasheet <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa211.pdf>