

Малогобаритный высокочувствительный датчик приближения инфракрасного диапазона

Д.Н. Беклемишев, А.Л. Переверзев, В.И. Янин

НИУ «МИЭТ», beklemishew.d.n@gmail.com

Аннотация— Рассмотрены особенности применения фотодиодов в миниатюрных датчиках приближения. Проведён сравнительный анализ, моделирование и макетирование предложенных схем усилителей-преобразователей: двухкаскадная по переменному току и трансимпедансная с активным подавлением фоновой засветки. Сформулированы требования к компонентной базе миниатюрных датчиков приближения.

Ключевые слова — миниатюрный оптический датчик приближения, высокочувствительные схемы, подавление постоянной составляющей.

I. ВВЕДЕНИЕ

Постановка задачи создания малогабаритных датчиков приближения накладывает существенные ограничения на принимаемые разработчиками технические решения, обеспечивающие малые габаритные размеры, энергопотребление и высокую надежность. Малые размеры датчика возможно реализовать только с применением простых оптических схем локации, однако при этом требуется увеличивать мощность излучения для обеспечения требуемой дальности обнаружения.

Традиционным решением указанного выше инженерного противоречия является использование импульсного метода локации [1, 2], при котором вычисление дальности до объекта выполняется по величине временного интервала между излучённым и принятым импульсами. Современные полупроводниковые лазерные диоды обеспечивают формирование импульсов с длительностью менее 50 нс и мощностью порядка нескольких сотен ватт. Импульсный метод не позволяет получить точность измерения дальности, сравнимую с фазовым методом, однако он обеспечивает повышение дальности обнаружения при относительно малом энергопотреблении. Именно эта особенность используется в неконтактных датчиках приближения, где факт обнаружения объекта в области наблюдения важнее, чем точность измерения дальности до него.

Основными проблемами, с которыми сталкиваются разработчики малогабаритных датчиков приближения инфракрасного диапазона, являются [3]:

- создание конструктивно простых и эффективных оптических схем;
- неравномерность мощности излучения;
- рассеяние лазерного излучения в атмосфере и аэрозолях;

- солнечная или иная нежелательная засветка фотоприёмного устройства;
- большой динамический и частотный диапазон принимаемых сигналов.

В качестве фотоприёмных устройств датчиков такого типа применяют фотодиоды, в частности ррн-фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД) [1,2]. Лавинные фотодиоды часто применяют для измерения расстояния на большой дальности (до 10 км), они обладают большим коэффициентом преобразования светового потока в электрический сигнал, но имеют очень узкое поле зрения, что обусловлено борьбой с нежелательными засветками. В ближней зоне кремниевые ррн-фотодиоды обладают рядом преимуществ:

- значительная площадь фотоприёмника (более 5 мм²);
- низкий уровень тепловых шумов;
- относительно низкий температурный коэффициент увеличения темнового тока.

Помимо этого, большая площадь чувствительного элемента обеспечивает существенное упрощение оптической части датчика, требующей настройки и чувствительной к параметрам внешней среды. Упрощение оптической части датчика позволяет уменьшить габаритные размеры, трудоёмкость и стоимость производства конечных изделий.

С учетом вышеизложенного, данная работа посвящена малогабаритным датчикам приближения на основе кремниевых ррн-фотодиодов. Рассмотрим особенности их применения в качестве чувствительного элемента.

Световой сигнал, отраженный от объекта наблюдения, попадает на фотодиод, эквивалентную схему которого можно представить в виде источника тока, обладающего внутренним сопротивлением R_d и ёмкости $p-n$ перехода C_d (рис. 1). Увеличение площади фотодиода приводит к увеличению светового потока, попадающего в чувствительную область, что в свою очередь приводит к увеличению чувствительности и обнаружительной способности фотоприёмного устройства. Увеличение площади приёмного устройства возможно за счет увеличения:

- размера чувствительной площадки одного фотодиода;
- количества фотоприёмных элементов.

В первом случае увеличение размера площадки приводит к увеличению ёмкости $p-n$ перехода и ухудшению частотных свойств приёмника. Применение многоэлементного приёмника позволяет избежать указанной проблемы, однако сигнал с каждого элемента приёмника нужно преобразовывать и усиливать. В качестве усилителей-преобразователей тока фотодиода в напряжение используются структуры на операционных усилителях (ОУ), также реализующие фильтрацию для обеспечения большего соотношения сигнал/шум на выходе фотоприёмного устройства.

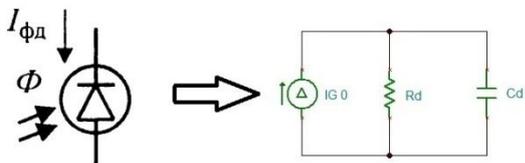


Рис. 1. Эквивалентная схема фотодиода

II. ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА

Частотный диапазон приёмного тракта определяет быстродействие фотоприёмного устройства и точность датчика приближения в целом. Пример распределения амплитуды импульсного сигнала по частоте представлен на рис. 2 (длительность сигнала 50 нс, частота следования 20 кГц).

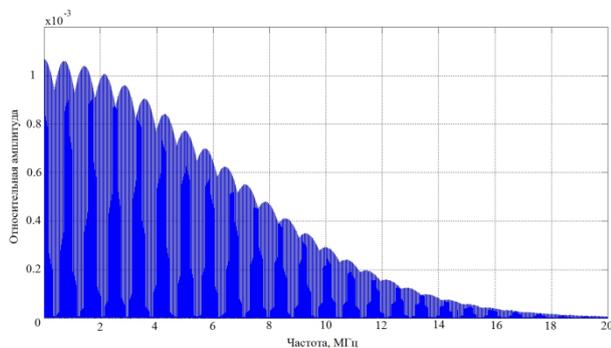


Рис. 2. Распределение амплитуды импульсного сигнала по частоте

Частотный диапазон принимаемого импульсного сигнала увеличивается обратно пропорционально его длительности. В импульсной лазерной локации длительность зондирующих сигналов необходимо делать как можно меньше. Это связано с уменьшением влияния обратного рассеяния в аэрозолях, взвешах, а также с потребностью в увеличении импульсной мощности излучателя. Сужение полосы пропускания усилительного тракта приводит к уменьшению амплитуды и увеличению длительности фронта сигнала на его выходе. Если амплитуда сигнала определяет чувствительность фотоприёмного устройства, то длительность фронта импульса определяет точность определения дальности до объекта наблюдения при сравнении сигнала с пороговым уровнем (рис. 3)[2,3]. Например, для фотопри-

ёмного тракта с частотой среза 10 МГц длительность фронта в режиме «слабого» сигнала будет равна:

$$t_f \approx \frac{0,35}{f_c} = \frac{0,35}{10 \cdot 10^6} = 35 \text{ нс.}$$

Ошибка определения дальности при такой длительности фронта – в зависимости от реализации порогового устройства – может составлять несколько метров. Из рис. 3 видно, что длительность фронта следует уменьшать для снижения ошибки определения дальности от объектов с малым коэффициентом отражения. Отметим, что вторым способом повышения точности определения дальности и учёта длительности фронта отражённого сигнала является оценка амплитуды импульса.

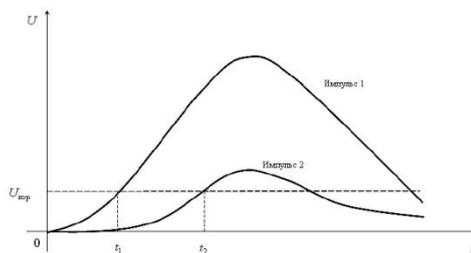


Рис. 3. Влияние длительности фронта на обнаружение импульса пороговым устройством

Ещё одной трудностью, с которой приходится сталкиваться разработчикам фотоприёмных устройств с большой чувствительной площадкой, является фоновая засветка фотоприёмного устройства, порой на несколько порядков превышающая мощность сигнала, отражённого от объекта наблюдения. Увеличение засветки приводит к увеличению шумов фотодиода и, как следствие, уменьшает чувствительность всей схемы.

Несмотря на то, что влияние фоновой засветки на информационный сигнал может быть уменьшено с помощью полосовых оптических фильтров, требуется компенсация фоновой засветки внутри фотоприёмного устройства. Таким образом, для построения малогабаритных высокочувствительных датчиков приближения требуется одновременно решить проблемы обеспечения высокого быстродействия при заданной чувствительности и компенсации фоновой засветки.

Целью моделирования и макетирования, проведённых авторами, является построение быстродействующего малогабаритного датчика приближения с пороговой чувствительностью не более 200 нВт и компенсацией фоновой засветки с длительностью фронта не хуже, чем 35 нс. Для моделирования были предложены две схемы усилителей, построенных на операционных усилителях: по переменному току и трансимпедансная с компенсацией постоянной составляющей. Для макетирования малогабаритных датчиков приближения из соображений упрощения аппаратной части и, как следствие, уменьшения габаритных размеров датчика был выбран одноэлементный приёмник.

III. СХЕМА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

В схеме усилителя по переменному току, рассмотренной, например, в [4], для преобразования тока фотодиода в напряжение используется резистор нагрузки (рис. 4). Постоянная составляющая блокируется конденсатором C1. Переменная составляющая сигнала подаётся на два усилительных каскада. На выходе второго каскада амплитуда переменной составляющей обладает уровнем, который можно обнаружить пороговым устройством.

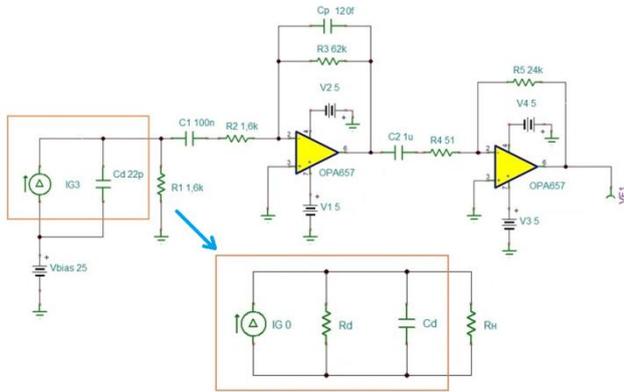


Рис. 4. Схема усилителя-преобразователя по переменному току

Оба каскада построены по схеме инвертирующего усилителя напряжения на базе декомпенсированного ОУ ОРА657 с полосой единичного усиления 1,6 ГГц и входным каскадом на JFET-транзисторах (обладающих малыми токами утечки). Широкая полоса единичного усиления позволяет построить инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления более 200 при полосе частот сигнала около 10 МГц. Конденсатор C_p имитирует паразитную монтажную ёмкость резистора обратной связи, а каскады между собой развязаны по постоянному току. Частотный диапазон и шумы усилительной схемы большей частью определяются резистором нагрузки и паразитной ёмкостью фотодиода. Для сигнала переменного тока (импульса) сопротивлением нагрузки будет являться сопротивление $(R1 \parallel R2)$. Шумы сопротивления нагрузки и фотодиода усиливаются в следующих каскадах так же, как и сигнал, что приводит к низкому соотношению сигнал-шум даже при большом коэффициенте усиления. Увеличение коэффициента усиления может быть выполнено двумя способами:

- увеличение номинала резистора обратной связи;
- уменьшение номинала резистора на инвертирующем входе ОУ.

Первый способ ведёт к тому, что полосу сигнала начинает ограничивать резистор обратной связи в совокупности с его паразитной ёмкостью, а второй способ ведёт к уменьшению сопротивления нагрузки по переменному току и соответствующему уменьшению амплитуды полезного сигнала при преобразовании ток-напряжение. Исходя из этих соображений, были выбраны промежуточные номиналы резисторов на-

грузки и резистора обратной связи, а методика оптимального выбора параметров такой схемы останется за пределами этой статьи. Нижняя граница полосы пропускания определяется RC-цепочками C1-R2 и C2-R4. Верхняя граница полосы пропускания в представленной схеме определяется коэффициентом усиления первого каскада, однако следует учитывать и другие ограничения, указанные выше.

Результаты моделирования представлены на рис. 5, амплитуда сигнала соответствует мощности на входе фотоприёмника 150 нВт, а среднеквадратическое значение шума в полосе 10МГц – 214 мВ, тогда амплитудное соотношение сигнал-шум приблизительно равно единице.

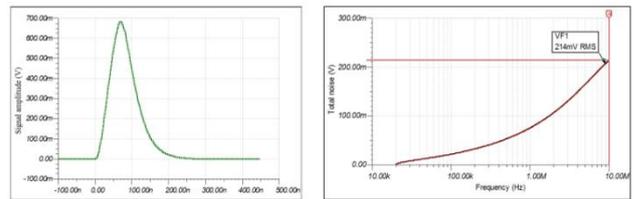


Рис. 5. Результаты моделирования схемы по переменному току

IV. ТРАНСИМПЕДАНСНАЯ СХЕМА С АКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Для устранения указанного недостатка схемы по переменному току была предложена трансимпедансная схема усилителя-преобразователя с активным подавлением постоянной составляющей, представленная на рис. 6.

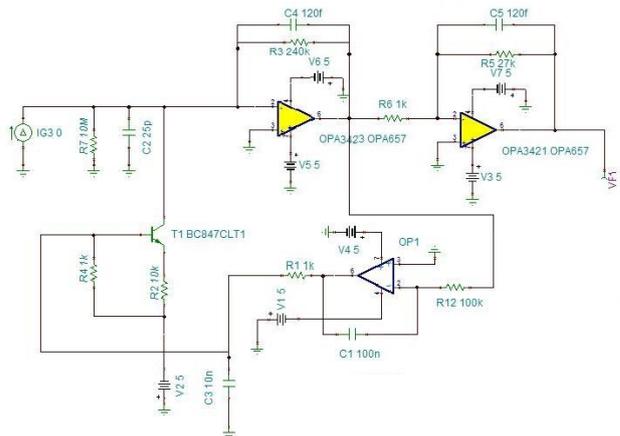


Рис. 6. Трансимпедансная схема усилителя-преобразователя

В данном случае коэффициент преобразования ток-напряжение равен

$$k = -I_{ig0} \cdot R3,$$

а полоса пропускания равна:

$$f_c = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi \cdot R3 \cdot C4}},$$

где GBP – это полоса единичного усиления ОУ.

В трансимпеданном включении схему с блокирующей фоновую засветку конденсатором применить нельзя, поэтому для подавления постоянной составляющей применяется интегратор на базе ОУ широкого применения с rail-to-rail выходами, выходное напряжение которого управляет обратной связью по постоянному току.

Результаты моделирования приведены на рис. 7. Амплитуда сигнала соответствует мощности на входе фотоприёмника 150 нВт, а среднеквадратическое значение шума в полосе 10 МГц – 67 мВ, среднеквадратическое значение шума значительно меньше, чем у схемы по переменному току.

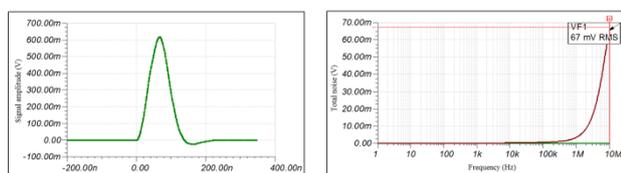


Рис. 7. Результаты моделирования трансимпеданной схемы

На основе данной схемы был создан макет на основе операционного усилителя ОРА657 (рис. 8). Макетирование показало сложность практического применения схем с общим усилением, большим 120 дБ: малый запас по фазе и помехи по питанию, возникающие при приёме импульсного сигнала, могут приводить к возбуждению усилительной схемы из-за конечной величины коэффициента ослабления синфазного сигнала в полосе частот.



Рис. 8. Макет фотоприёмного устройства

Результатом макетирования является миниатюрный приёмопередающий модуль, содержащий фотоприёмную схему, схему первичной обработки, компаратор и схему излучателя, размещённые на печатной плате размером 160 мм² (диаметр платы 28 мм). Макет показал работоспособность схемы компенсации постоянной составляющей при освещённости до 10000 люкс.

Возможно увеличение чувствительности фотоприёмного устройства при использовании ОУ, обладающего большей полосой единичного усиления, например, LTC6268-10 (4 ГГц). В зависимости от применяемой технологии необходимые параметры могут быть получены и на отечественной компонентной базе, если использовать дискретные компоненты – транзисторы, однако этот подход требует дополнительного исследования.

Отметим основные особенности этой схемы:

- высокая чувствительность;
- коэффициент преобразования задаётся одним резистором в обратной связи ОУ;
- шумы схемы в основном определяются шумами ОУ первого каскада;
- частотный диапазон ограничен свойствами операционного усилителя;
- возможно применение подобной схемы в ВОЛС.

V. Выводы

Так как построение надёжных фотоприёмных устройств возможно при максимальном упрощении оптической схемы, то для сохранения обнаружительной способности, требующейся в датчиках приближения, предполагается использование pin-фотодиодов с большой чувствительной площадкой. При этом для сохранения обнаружительной способности объекта локации требуется использовать импульсный метод измерения дальности, увеличить чувствительность фотоприёмной схемы и обеспечить компенсацию фоновой засветки фотоприёмного устройства.

Сравнительный анализ предложенных структур фотоприёмных устройств показал, что использование трансимпеданной схемы с активной компенсацией постоянной составляющей позволяет достичь лучших параметров по чувствительности и частотным свойствам даже при значительном уровне освещённости по сравнению со схемой по переменному току. Проведённое макетирование этой схемы позволило реализовать излучатель с импульсной мощностью 90 Вт и фотоприёмное устройство с пороговой чувствительностью менее 150 нВт на одной печатной плате площадью 160 мм².

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козинцев В.И., Белов М.Л. Орлов В.М. и др. Основы импульсной лазерной локации. –М: МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2010.
- [2] Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб.пособие / В.Б. Бокшанский, Д.А. Бондаренко, М.В. Вязовых, И.В. Животовский, А.А. Сахаров, В.П. Семенов; под ред. В.Е. Карасика. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [3] Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации. – М.: МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2006.
- [4] Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств, М.: Бином, 2010.
- [5] Беклемишев Д.Н., Переверзев А.Л. Эвристический алгоритм оценки среднеквадратического отклонения дискретного сигнала. Межвузовский сборник «Информационно-управляющие вычислительные системы: алгоритмы, аппаратные и программные средства» под ред. В.А. Бархоткина. – М.: МИЭТ, 2011, с.25-32.
- [6] Переверзев А.Л., Беклемишев Д.Н., Кудров А.А. Разработка интегрированного модуля адаптивной цифровой обработки сигналов для лазерного импульсного дальномера. – Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 11-2. с. 72-76.

Miniature and highly sensitive proximity infrared sensor

D.N. Beklemishev, A.L. Pereverzev, V.I. Yanin

National Research University of Electronic Technology (MIET), beklemishev.d.n@gmail.com

Keywords— miniature optical proximity sensor, high sensitive circuits, large area IR-detector, DC-current rejection.

AC-circuit and transimpedance circuit with active backlight suppression.

ABSTRACT

The article considers the issue of creating miniature and at the same time highly sensitive proximity infrared sensor. Such sensors are based on semiconductor lasers and photodiodes, and use impulse laser location principle. Signal from photodiode contains AC and DC components. AC component is much smaller than DC, which must be removed. Besides, signal rise time, frequency range and sensitivity of sensor depend on one another. This creates a big problem for miniature proximity sensor designer.

These highly sensitive circuits are based on operational amplifiers because of their integrated realization and parameter stability. The article gives comparative analysis of the two proposed OA-circuits: AC-circuit and direct current-to-voltage converter – TIA-circuit with active DC-current rejection. Both circuits were created based on required sensitivity of 150 nW. The second approach allows building highly sensitive circuit with lower noise level and lower signal rise time even using large-area photodiodes. Comparative analysis, simulation and prototyping of two types of amplifier-converter circuits were made: two-stage

REFERENCES

- [1] V.I. Kozintsev, M.L. Belov, V.M. Orlov and others. Basics of pulsed laser ranging. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2010.
- [2] V.B. Bokshansky, D.A. Bondarenko, M.V. Elm, I.V. Zhivotovsky, A.A. Sakharov, V.P. Semenov; ed. by V.E. Karasik. Laser devices and methods of measuring range: proc. manual. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2012.
- [3] M.P. Musyakov, I.D. Mitsenko, G.G. Ivanov. Problems of near laser ranging. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2006.
- [4] V.B. Topilskiy. Circuitry of measuring devices. Moscow, Binom, 2010.
- [5] D.N. Beklemishev, A.L. Pereverzev. Heuristic algorithm for estimating of the standard deviation of a discrete signal. Interuniversity collection "Information management computing: algorithms, hardware and software" ed. by V.A. Barkhotkin. Moscow, MIET 2011, p.25-32.
- [6] A.L. Pereverzev, D.N. Beklemishev, A.A. Kudrow. Development of an integrated module of adaptive digital signal processing of the laser pulse rangefinder. - Proceedings of the Tula State University. Technical science. 2012. No. 11-2. p. 72-76.