

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.501

**Фотоэлектронный модуль в режиме счета фотонов
с гальванической развязкой для лазерного зондирования
атмосферы**

С.Н. Волков*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.11.2007 г.

В качестве оптимального решения задачи электромагнитной совместимости в лазерном зондировании атмосферы впервые предложен фотоэлектронный модуль, основанный на полной гальванической развязке входного каскада, чувствительного к электромагнитным помехам. 32-канальный фотоэлектронный модуль работает в режиме счета фотонов, имеет TTL/CMOS совместимый выход, согласованный с нагрузкой на 50-омный кабель.

Ключевые слова: счет фотонов, лазерное зондирование, электромагнитные помехи, фотоэлектронный модуль.

Введение

Метод счета фотонов широко используется в лазерном зондировании атмосферы для регистрации сигналов от объектов с небольшими сечениями рассеяния, расположенными на значительном расстоянии от наблюдателя. Аппаратные приемы реализации метода счета фотонов зависят от конкретных задач зондирования. Однако при этом приходится решать проблему снижения уровня электромагнитных помех (ЭМП).

Наиболее подверженным влиянию помех в лидарном зондировании является фотоэлектронный модуль, если под модулем понимать фотоэлектронный приемник и предварительный усилитель входного сигнала. Наводимые в процессе лазерного зондирования синхронные помехи от работы лазера на приемную аппаратуру способны не только исказить принимаемые данные, но и вызвать появление фантомных сигналов.

Наиболее сложным случаем при проектировании фотоэлектронного модуля является достижение минимального уровня шума при соответствии входного потока фотонов потоку выходных данных приемного устройства. Кроме того, при создании подобных модулей необходимо стремиться к созданию универсальных решений, таких, которые можно использовать в разнообразных задачах зондирования, без предварительной адаптации к остальным электронным компонентам лидарной системы. К настоящему времени решений, удовлетворяющих требованиям лидарного зондирования, практически не существует. Экспериментатору постоянно приходится

решать сложную задачу учета влияния ЭМП при создании лидарных систем.

Можно сделать вывод, что актуальными в настоящее время становятся универсальные решения, позволяющие компоновать лидарную систему из доступной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) без существенного снижения уровня функциональности.

В качестве решения задачи электромагнитной совместимости впервые предложен фотоэлектронный модуль, основанный на полной гальванической развязке входного каскада, чувствительного к ЭМП. 32-канальный фотоэлектронный модуль работает в режиме счета фотонов, имеет TTL/CMOS совместимый выход, согласованный с нагрузкой на 50-омный кабель. Применение в модуле цифровых изоляторов, созданных на основе последних достижений магнитоэлектроники [1], позволило на порядок увеличить скорость счета фотоэлектронов.

1. Особенности электромагнитной совместимости в лидарных системах

Электромагнитная помехоустойчивость (ЭМПУ) выходит на первый план при проектировании лидарных систем для регистрации отдельных фотонов. В практике разработки радиоэлектронной аппаратуры принято подразделять ЭМП на межсистемные (МЭМП) и внутрисистемные (ВЭМП) электромагнитные помехи [2]. В лазерном зондировании атмосферы к межсистемным ЭМП можно отнести, например, фон от дневного неба в оптическом диапазоне. К внутрисистемным ЭМП относятся искажения, вызванные большим динамическим диапазоном сигнала в оптическом диапазоне, помехи от работы лазера и т.д.

* Сергей Николаевич Волков (snvolk@iao.ru).

Лидарная система регистрации фотонов, в рамках сложившегося к настоящему времени стереотипа [3], показана на рис. 1.

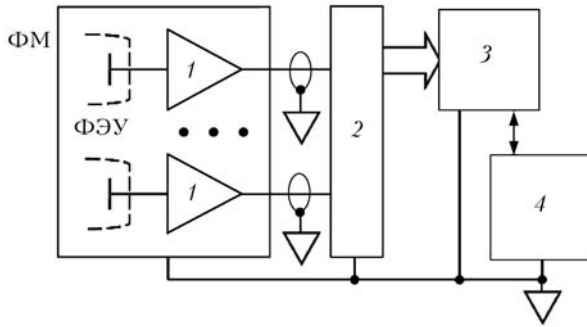


Рис. 1. Система регистрации фотонов: 1 – усилитель; 2 – счетчик фотонов; 3 – компьютер; 4 – лазер

Она состоит из фотоэлектронного усилителя (ФЭУ) с усилителями сигналов, обозначенными как фотоэлектронный модуль (ФМ), в который входят один либо несколько отдельных ФЭУ, и счетчика фотонов 2. В состав современных счетчиков фотонов (общепринятое название систем сбора импульсов от фоточувствительных датчиков) входят преобразователи аналоговых сигналов в цифровую форму с управляемым порогом преобразования. На рис. 1 показано, что счетчик фотонов, в свою очередь, связан с компьютером пользователя 3 либо непосредственно, либо через сеть Ethernet. В такой системе наиболее чувствительным к ЭМП оказывается фотоэлектронный модуль.

Рассмотрим пути распространения ВЭМП, характерные для лидарной системы зондирования:

1. При работе ФЭУ в режиме счета фотонов возникает эффект последствия [4]. Сущность явления заключается в том, что после регистрации фотона и появления на выходе ФЭУ одноэлектронного импульса в течение некоторого времени существует вероятность регистрации дополнительных счетных импульсов. Этот эффект различен для разных типов ФЭУ и проявляется в том, что измеренный сигнал искажен пропорционально величине сигнала. Исследования показали [5], что для фотоприемников типа ФЭУ-130 вероятность последствия $\varphi(t)$ описывается с помощью следующего приближения:

$$\varphi(t) = P \left[c_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + c_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (1)$$

где коэффициенты $P = 0,052$; $c_1 = 0,48$ и $c_2 = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ мкс}^{-1}$; $\tau_1 = 1,49$ и $\tau_2 = 51 \text{ мкс}^{-1}$.

2. Существенное влияние на работу фотоэлектронного модуля оказывают помехи от переходных импульсных процессов. Алгоритм работы лидарной системы таков, что импульсная помеха от работы лазера 4 на рис. 1 возникает в первых стробах каждого принимаемого сигнала. Полоса пропускания ФМ (приемник помех) в счетном режиме сопоставима с широкополосной помехой от лазера (источник помех), поэтому практически вся мощность

помехи попадает на вход приемника. Таким образом, напряжение помехи

$$U_{CN} = C_{TR} \Delta e, \quad (2)$$

где C_{TR} – коэффициент связи источника помехи и приемника; Δe – амплитуда помехи источника. При входном сопротивлении приемника Z напряжение внутреннего шума

$$U_R = \sqrt{ZFkTB_R}, \quad (3)$$

где F – коэффициент шума приемника; $kT = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/Гц}$ (при $T = 300 \text{ К}$); B_R – полоса пропускания приемника. Согласно (2) и (3) отношение помеха/шум на входе приемника

$$\frac{U_{CN}}{U_R} = \frac{K}{\tau \sqrt{B_R}}, \quad (4)$$

где K – постоянная; τ – длительность импульса помехи. Таким образом, отношение помеха/шум обратно пропорционально квадратному корню из полосы пропускания B_R [2].

3. Особенностью ФМ является малое значение нижней граничной частоты f_L в полосе пропускания:

$$f_L \rightarrow 0. \quad (5)$$

Это приводит к возникновению эффекта последствия от импульсной помехи. Импульсные помехи от работы лазера вызывают накопление энергии в емкостях и индуктивностях ФМ. Следующий за этим процесс диссипации энергии, связанный с возвращением системы в исходное состояние, способен повлиять на профиль измеряемого сигнала, кроме того, возможно появление фантомных сигналов.

Цепи питания и земли в лидарной системе также являются путями распространения ВЭМП. Выполнить все требования по экранировке РЭА, минимизации цепей питания, соединения цепей земли в «звезду» и т.д. возможно только для узкоспециализированных компактных лидарных систем. Для решения задачи прогнозирования ВЭМП требуется выделение значительных ресурсов. Для лидарных систем, функционирующих в лабораторных условиях, достаточно трудно обеспечить требования по электромагнитной совместимости. В большинстве случаев это связано с необходимостью применения в лидарной системе контрольной аппаратуры (осциллографы, мультиметры и т.д.), стандартных источников питания, компьютеров и т.д., т.е. компонентов, связанных между собой протяженными электрическими цепями.

Обычно применяемое при разработке РЭА решение с целью снижения ЭМП [6] – нагружение ФМ на 50-омный соединительный кабель. Как следствие, в ФМ ФЭУ также обычно нагружают на вход усилителя с таким же входным сопротивлением. В результате высокоэффективный к ЭМП ФЭУ оказывается неэффективно согласованным. Кроме того, в такой системе присутствуют электрические цепи, по которым возможно протекание больших токов помехи.

Полная гальваническая развязка чувствительных к ЭМП ФЭУ и предварительного усилителя предпочтительна для ФМ, работающих в составе лидарных систем с высоким уровнем ВЭМП. Однако до недавнего времени такое решение было возможно только для ФМ в аналоговом режиме. Решения для режима счета фотонов наталкивались на низкую эффективность изолирующих передатчиков сигнала. Появление цифровых изолирующих передатчиков, использующих гигантский магнито-резистивный эффект [7], позволяет в значительной мере устранить этот недостаток.

2. Описание фотоэлектронного модуля

На рис. 2 показан состав ФМ, предназначенного для работы в режиме счета фотонов в составе лидарной системы. Функционально ФМ состоит из мультианодного ФЭУ Н7260 фирмы «Hamamatsu», 32 выхода которого через разъем выведены на 4 восьмиканальные платы, размещенные в виде этажерки друг над другом.

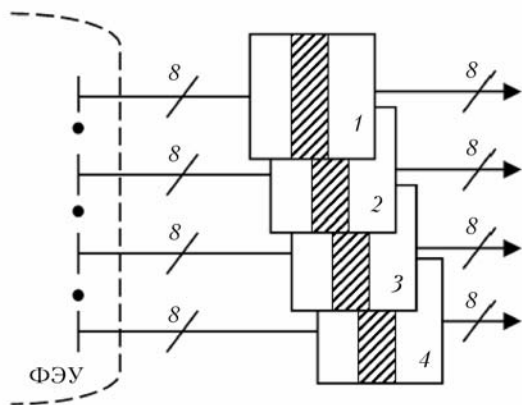


Рис. 2. Фотоэлектронный модуль для работы в режиме счета фотонов: 1–4 – 8-канальные усилители/дискриминаторы с гальванически изолированными выходами

На рис. 3 показан состав восьмиканальных плат усилителей/дискриминаторов с полной гальванической развязкой. Каждая плата содержит по три гальванически развязанных блока:

- 1) в первом блоке находятся усилители и дискриминаторы уровня;
- 2) во втором блоке расположен восьмиканальный буферный усилитель;
- 3) в третьем блоке разведены DC-DC-преобразователи.

Мультианодный ФЭУ Н7260 имеет следующие основные параметры:

спектральное разрешение, нм	.....	185–650
количество анодов	.....	32
анодная чувствительность, А/Лм	.....	140
длительность одноэлектронного импульса, нс	.....	0,16
темновой шум анода, имп/с	.....	600

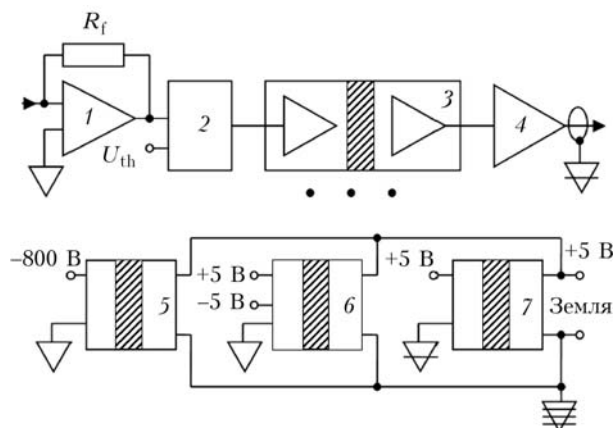


Рис. 3. Состав 8-канального усилителя/дискриминатора: 1 – трансимпедансный усилитель (R_f – сопротивление обратной связи); 2 – дискриминатор уровня (U_{th} – напряжение уровня дискриминации); 3 – цифровой изолятор; 4 – буферный усилитель; 5 – DC-DC-конвертер с изолированным выходом -800 В для питания ФМ; 6 – DC-DC-конвертер с изолированным двуполярным выходом ± 5 В для питания входного каскада; 7 – DC-DC-конвертер с изолированным выходом 5 В для питания выходного буферного усилителя

Усилители 1 в первом блоке сделаны по трансимпедансной схеме (рис. 3) и содержат по одному каскаду усиления. Такое построение позволяет: эффективно скомпенсировать большую емкость выхода ФЭУ, обычно находящуюся в пределах 5 pF; согласовать высокое выходное сопротивление ФЭУ с входом усилителя. Кроме того, выходное сопротивление усилителя близко к нулю, что позволяет легко осуществлять согласование с последующими цепями в электронной схеме. Усилитель имеет следующие параметры:

полоса пропускания усилителя, МГц	.....	100
коэффициент усиления, В/А	.....	10^4

Такие параметры в однокаскадной схеме достигнуты благодаря применению операционного усилителя ОРА847 фирмы «Burr-Brown». Полоса единичного усиления операционного усилителя составляет $3,9$ ГГц, напряжение шума, приведенное ко входу, $-0,85$ нВ/Гц^{1/2}.

Следующий компонент первого блока – дискриминаторы уровня 2 (рис. 3), преобразующие аналоговый сигнал в цифровую форму. Дискриминаторы построены на двух счетверенных компараторах МАХ964 фирмы «Maxim» и обладают задержкой распространения $4,5$ нс. Порог дискриминации задается с помощью переменного резистора и одинаков для всех каналов усиления. Такое решение выбрано, исходя из предположения идентичности распространения ВЭМП по каналам усиления.

Второй блок построен на микросхеме 74АВТ541 фирмы «Fairchild» 8-канального буфера 4 (рис. 3). Нагрузкой буфера на выходе, для связи со счетчиком фотонов, служит 50-омный кабель.

В качестве гальванической развязки между первым и вторым блоками используются 4 двухканальных цифровых изолятора IL711 3 фирмы

NVE. Принцип действия изоляторов основан на использовании гигантского магниторезистивного эффекта. Изоляторы рассчитаны на напряжение изоляции 2,5 кВ. Задержка распространения составляет 10 нс. Скорость передачи данных через изоляторы достигает 150 Мбит/с, что примерно на порядок больше, чем скорость передачи данных других изоляторов, использующих, например, оптоэлектронный эффект.

Третий блок содержит два DC-DC-преобразователя фирмы «Texas Instruments»: первый (DCP020505D) преобразует входное напряжение 5 В в двуполярное ± 5 В для питания первого блока (обозначен цифрой 6 на рис. 3); второй (DCP020505) – входное напряжение 5 В без изменения для питания второго блока 7. Кроме того, третий блок содержит компактный DC-DC-преобразователь 5 фирмы EMCO с выходом –800 В для питания ФЭУ. Гальваническая развязка между входом и выходами преобразователей работоспособна при напряжении 3 кВ.

С целью снижения уровня ВЭМП платы разведены на подложке из стеклотекстолита в 4 слоя. Первый слой отведен под поверхностный монтаж элементов. Полигоны земли, «прошитые» через плату, дополняют разводку. Второй и четвертый слои отведены под отдельные земли так, чтобы гальванически развязанные полигоны земель блоков были сплошными. Третий, внутренний, слой отведен под полигоны цепей питания. Размеры плат составляют 76 × 98 мм. Платы идентичны по разводке, и только одна используется для установки на ней источника питания ФЭУ и переменного резистора регулировки уровня порога дискриминации. При использовании малогабаритных компонентов и принятии мер по увеличению плотности монтажа габариты плат можно уменьшить на 30%.

Заключение

Гальваническая развязка входных усилителей от буферного выходного каскада позволяет снизить мощность обратных токов по слою земли входного каскада примерно в 16 раз, что существенно снижает уровень ВЭМП. Дополнительная гальваническая развязка цепей питания ФМ также позволяет существенно уменьшить влияние ЭМП. Размещение высоковольтного источника питания ФЭУ на плате позволяет сократить длину электрических цепей, чувствительных к ЭМП. Гальваническая развязка по цепям питания также способствует уменьшению наводимых ЭМП. Мощность DC-DC-преобразователя для питания буферного каскада составляет 2 Вт, что позволяет ФМ выдерживать перегрузку от ближней зоны принимаемого лидарного сигнала.

S.N. Volkov. The photoelectric photon counter module with a galvanic decoupling for laser sounding of the atmosphere.

To gain the optimal solution of the problem of electromagnetic compatibility in laser sounding of the atmosphere, the photoelectric module, grounded on the full galvanic decoupling of an input stage, sensitive to electromagnetic disturbances is offered for the first time. 32 channel photoelectric module works in the regime of the account of photons, has the TTL/CMOS compatible exit, agreed with a loading on a 50/Ohm cable.

В настоящее время фотоэлектронный модуль проходит испытания в КАЕРИ (Институт исследования атомной энергии, Южная Корея). Лидарная система представляет собой лабораторную установку для измерения вертикального профиля влажности в атмосфере. ФМ расположен на выходе двойного полихроматора, смонтированного на лабораторной плите, и регистрирует рамановский спектр паров воды, возбуждаемый в атмосфере лазером с длиной волны 355 нм. С помощью коаксиального кабеля ФМ соединен с четырьмя 8-канальными счетчиками фотонов фирмы Becker & Hickl GmbH. Счетчики фотонов могут располагаться в системных шинах разных компьютеров. Взаимная гальваническая развязка выходов ФМ, который имеет четыре гальванически развязанных восьмиканальных выхода, позволяет эффективно устранить помехи от токов утечек на корпуса компьютеров.

Предлагаемый новый тип фотоэлектронного модуля в режиме счета фотонов с полной гальванической развязкой способен функционировать в условиях повышенных помех и особенно востребован в лазерном зондировании атмосферы. На базе предлагаемых решений по уменьшению ВЭМП возможно создание целого ряда ФМ, объединенных по общему признаку, – полная гальваническая развязка входных каскадов, наиболее чувствительных к влиянию ЭМП.

Автор выражает признательность Д.И. Шелефонтьюку за полезные советы при обсуждении материала статьи.

1. *Prinz G.A.* Spin-polarized transport // *Phys. Today*. 1995. N 4. P. 58–63.
2. *Уайт Д.Р.Ж.* (составитель), Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения / Под ред. А.И. Сапира. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
3. *Шелефонтьюк Д.И.* Системы счета фотонов для лазерного зондирования атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8. № 9. С. 1374–1377.
4. *Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л.* Коррекция лидарных сигналов на шум последствия ФЭУ // *Оптика атмосф.* 1990. Т. 3. № 11. С. 1226–1228.
5. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* О применении фотомножителей для приема сигналов при лазерном зондировании // *Изв. вузов СССР. Физ.* 1973. № 10. С. 144–146.
6. *Borders R.A., Borders J.A., Birks J.W.* High speed pulse amplifier/discriminator and counter for photon counting // *Anal. Chem.* 1980. V. 52. N 8. P. 1273–1278.
7. *Baibich M.N., Broto J.M., Fert A.F., Nguyen Van Dau, Petroff F., Eitenne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J.* Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61. N 21. P. 2472–2476.