

ТРЕХМЕРНОЕ ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ© 2005 г. **И. Ф. Ярошенко**, канд. техн. наук; **С. А. Ильин**; **Г. А. Капитанов**

НПО “Астрофизика”, Москва

E-mail: aphysica @ aha.ru

Рассмотрены схемы обработки трехмерного изображения, основанные на сочетании счетно-импульсного и времяамплитудного методов преобразования. Приведены результаты испытаний трехмерного приемного устройства в составе лабораторного макета ладара.

Коды OCIS: 100.6890.

*Поступила в редакцию 12.01.2005.***Введение**

Перспектива развития современной лазерной локации связана с созданием высокоинформативных локационных систем, обеспечивающих решение ряда актуальных задач, которые радиолокационными средствами и оптическими пассивными тепло- и телевизионными системами решены быть не могут. К проблемным задачам локации можно отнести высокоточные трехкоординатные измерения, регистрацию объемного изображения объектов, задачи селекции и идентификации целей.

Отраженный от поверхности объекта лазерный сигнал имеет пространственно-временную структуру и содержит, кроме трехкоординатной информации, данные о трехмерной форме и отражательных свойствах объекта. Извлечь весь объем информации, заключенной в лазерном сигнале, позволяет новый класс трехмерных приемников лазерного излучения, обладающих пространственно-временной разрешающей способностью, в которых в качестве первичного преобразователя изображения используется многоэлементный детектор “мгновенного” действия, имеющий независимые выводы со всех элементов матрицы. Благодаря высокому быстродействию форма временного сигнала в элементах матрицы преобразуется без искажения, что является необходимым условием работы высокоточных времяизмерительных систем. При широкополосном зондировании сцены временная задержка отраженного от объекта сигнала, измеренная в каждом элементе матрицы, однозначно связана с продольной характеристикой трехмерного объекта – его глубиной. Угловое разрешение лазерного локатора определяется размером матрицы. Таким образом, трехмерный приемник лазерного излучения позволяет реализовать метод лазерной стереометрии – прямой метод измерения в полярных координатах (угол–угол–дальность) трехмерной формы объекта наблюдения. При этом качество трехмерного изображения объекта, в отличие от тепло- и телевизионных приемников, не зависит от величины контраста, который может быть равен нулю.

Лазерные системы воспроизведения трехмерного изображения в настоящее время разрабатываются в интересах как военных, так и гражданских применений. В военной области ладары – лазерные локаторы регистрации трехмерного изображения – разрабатываются для решения задач распознавания целей, селекции, высокоточного наведения, предотвращения столкновения с препятствиями и ряда других задач. Области гражданского применения трехмерных приемников являются топография, топометрия, многоканальная спектрофлуорометрия, экспериментальная физика, подводная картография и т. д.

Разработка ладаров за рубежом

За рубежом десятки фирм ведут разработку высокоинформативного ладара космического, воздушно-го и наземного базирования. Ладары предполагается использовать в головках самонаведения автономно управляемых ракет, беспилотных летательных аппаратах, самолетах пятого поколения, в системах ПРО для селекции головных частей ракет.

Исследовательская лаборатория Армии США в среднесрочной перспективе планирует оснастить ракеты и беспилотные боевые самолеты ударного и разведывательного назначения (в дополнение к радиолокационной системе) пассивной многоспектральной системой датчиков и несканирующим ладаром, дающим трехмерное изображение с очень высокой разрешающей способностью [1]. На макете было продемонстрировано, что регистрация трехмерных данных высокого разрешения существенно повышает возможности наблюдения и интерпретации сложных и зашумленных сцен, обнаружения и идентификации целей. Многоспектральный инфракрасный датчик должен осуществлять поиск наземных целей. При этом вероятность обнаружить ложную цель достаточно велика, так как цель может быть скрыта помехами, иметь низкий тепловой контраст. Ладар будет регистрировать трехмерное изображение высокого разрешения в окрестности обнаружения инфракрасным датчиком “подозрительных”

объектов, чтобы подтвердить наличие цели и идентифицировать ее. Взаимодействие средств наблюдения позволяет решить задачи распознавания, слежения и поражения наземных мобильных целей, а также же точного картографирования местности.

ВВС США финансируют разработку ладара, используемого в головках самонаведения воздух/воздух и воздух/земля, для решения задач идентификации целей и точного наведения [2]. Основной целью работы является создание на базе матричного приемника моноимпульсного ладара (FLASH-system). В качестве первичного преобразователя применена мозаика дискретных лавинных InGaAs-фотодиодов. Погрешность измерения дальности составляет 1 м. Приемник регистрирует трехмерное изображение в координатах угол–угол–дальность. На следующем этапе разработки предусмотрено ввести канал измерения интенсивности и регистрировать объемное изображение в координатах угол–угол–дальность–интенсивность.

По совместной программе CELRAP [3] США и Японии ведут разработку многофункционального ладара, предназначенного для установки на различных платформах. Программа направлена на научные исследования, испытания и анализ макетных прототипов ладаров. Лазерный передатчик излучал импульсы длительностью 8 нс и энергией 0,1 Дж на длине волны 1,54 мкм. Луч расширялся в вертикальном направлении, и осуществлялось сканирование лучом по азимуту.

Приемная система содержала два канала – приемник обнаружения препятствий и приемник регистрации трехмерного изображения. Для преобразования лазерного излучения была применена 32-элементная фотодиодная линейка на основе HgCdTe. При измерении дальности в каждом элементе приемника использовался счетно-импульсный метод преобразования время–код, обеспечивающий погрешность измерения 1 м.

При проведении полевых испытаний решались задачи картографии, обнаружения препятствий, получения трехмерного изображения объекта наблюдения. При обнаружении высоковольтной линии передач с диаметром проводов 10 мм дальность обнаружения препятствий составила 480 м.

Основные технические достижения этапа программы CELRAP связаны с новой конструкцией оптического параметрического генератора, фотодиодной линейкой и устройством параллельной электронной обработки изображения. Идеальным решением для выполнения программы является матричный приемник, обеспечивающий погрешность измерения дальности 10 см и регистрирующий объемное изображение в координатах угол–угол–дальность–интенсивность. Однако стоимость разработки такого приемника значительно превышает объем средств, выделенных на данную программу.

Из приведенных примеров следует, что отсутствие трехмерного матричного приемника лазерного излучения с требуемыми параметрами является основным фактором, сдерживающим создание моноимпульсного ладара. Ладарный приемник должен регистрировать объемное изображение в координатах угол–угол–дальность–интенсивность, иметь размер матрицы 32×32 элемента и обеспечить погрешность измерения дальности в несколько сантиметров.

Схема трехмерного приемного устройства

Функциональным назначением трехмерного приемника является преобразование изображения объекта на фоточувствительной поверхности в цифровой код, содержащий информацию об отражательных свойствах и трехмерной форме объекта наблюдения. Функциональная схема устройства приведена на рис. 1. Изображение регистрируется первичным преобразователем. Последующую обработку электрического сигнала выполняет блок аналоговой обработки, который выделяет сигнал изображения и измеряет его параметры. Измеренные параметры сигнала изображения запоминаются в блоке аналоговой памяти. Цифровую обработку изображения осуществляет сигнальный процессор.

Трехмерный приемник измеряет в каждом элементе энергию, временное положение оптического импульсного сигнала, а также временной интервал между зондирующим и отраженным от объекта импульсами. Данная задача типична для времяизмерительной системы, для которой основными критериями качества являются разрешающая способность и точность временных измерений. При этом требования по временному разрешению и точности соответствуют пикосекундной области – предельно достижимой в настоящее время области измерения. Временные измерения обеспечивает импульсный режим работы устройства, который является типичным для данного класса приемников изображения, в отличие от двумерных приемников, работающих в режиме накопления заряда.

В режиме накопления (тепло- и телевизионный приемники) в каждом пикселе за время кадра, которое определяет временное разрешение приемника, происходит накопление заряда, создаваемого излучением. Тем самым фоточувствительный элемент осуществляет преобразование, выделение и запоминание сигнала за время экспозиции. Затем сигналы элементов матрицы последовательно передаются электронной схемой считывания ROIS (мультиплексированием в один или несколько каналов) на выход приемника. При этом схема считывания достаточно проста – на каждый пиксел приходится 3–4 транзисторных элемента ROIS.

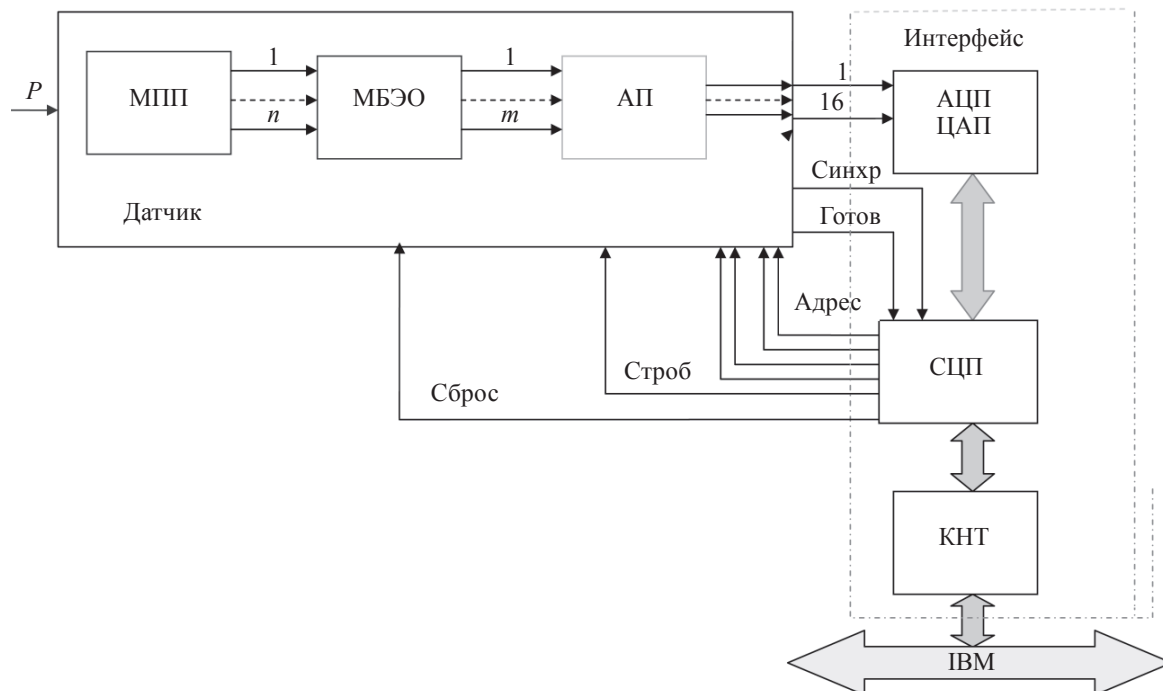


Рис. 1. Функциональная схема устройства. МПП – матричный первичный преобразователь, МБЭО – многоканальный блок электронной обработки, АП – аналоговая память, СЦП – сигнальный цифровой процессор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, КНТ – контроллер.

В трехмерном приемнике проводится параллельная электронная обработка наносекундных импульсных сигналов с матричного детектора одновременно со всех его элементов. В каждом канале до мультиплексирования требуется обнаружить сигнал и измерить несколько его параметров, для чего требуется до 10 быстродействующих микросхем на один канал. К особенностям параллельной электронной обработки следует отнести возникновение характерных помех, устранение которых является трудноразрешимой задачей.

В качестве первичного преобразователя изображения в трехмерном приемнике применяют многоэлементный детектор “мгновенного” действия (многоэлементный ФЭУ на микроканальных пластинах, фотодиодные матрицы и матрицы на лавинных фотодиодах) с полной электрической развязкой отдельных элементов, необходимой для реализации параллельной электронной обработки сигнала изображения. При создании таких многоэлементных детекторов (мозаик) основные технологические трудности связаны с изоляцией отдельных элементов друг от друга и подведением электрических контактов к ним. Если контакты выполнены в изолирующих промежутках (ззорах), ухудшаются такие параметры матрицы, как коэффициент заполнения и паразитная межэлементная емкость. Улучшить данные параметры удастся для матриц, засвечиваемых с тыльной стороны.

В макете приемного устройства в качестве детектора использовался либо многоэлементный ФЭУ

[4], либо фотодиодная матрица S3805 фирмы “Hamamatsu” с числом элементов 16×16.

Трехмерное устройство выполнено в виде фотоприемной камеры, содержащей ряд модулей (см. рис. 2):

- модуль первичного преобразователя изображения МПП,
- модуль электронной обработки изображения МЭО,
- модуль цифровой обработки изображения МЦО,
- модуль прецизионного преобразования временных интервалов МППВ,
- модуль вторичного источника питания МВИП.

Функционально интегрированный модуль многоканальной электронной обработки МЭО состоит из четырех идентичных плат, включающих схемы обработки двумерного ДИ и трехмерного ТИ изображений. В зависимости от размеров объекта разброс в моментах возникновения сигнала в каналах может составлять доли микросекунд. Модуль обеспечивает регистрацию объемного изображения в координатах угол–угол–дальность–интенсивность.

Двумерное изображение отображает распределение интенсивности сигнала в плоскости первичного преобразователя изображения ППИ. Схема регистрации измеряет энергию сигнала в элементах матрицы за время экспозиции порядка 1 мкс. Схема состоит из n независимых идентичных цепей, включающих зарядочувствительный усилитель и стробируемый интегратор и обеспечивающих высокую

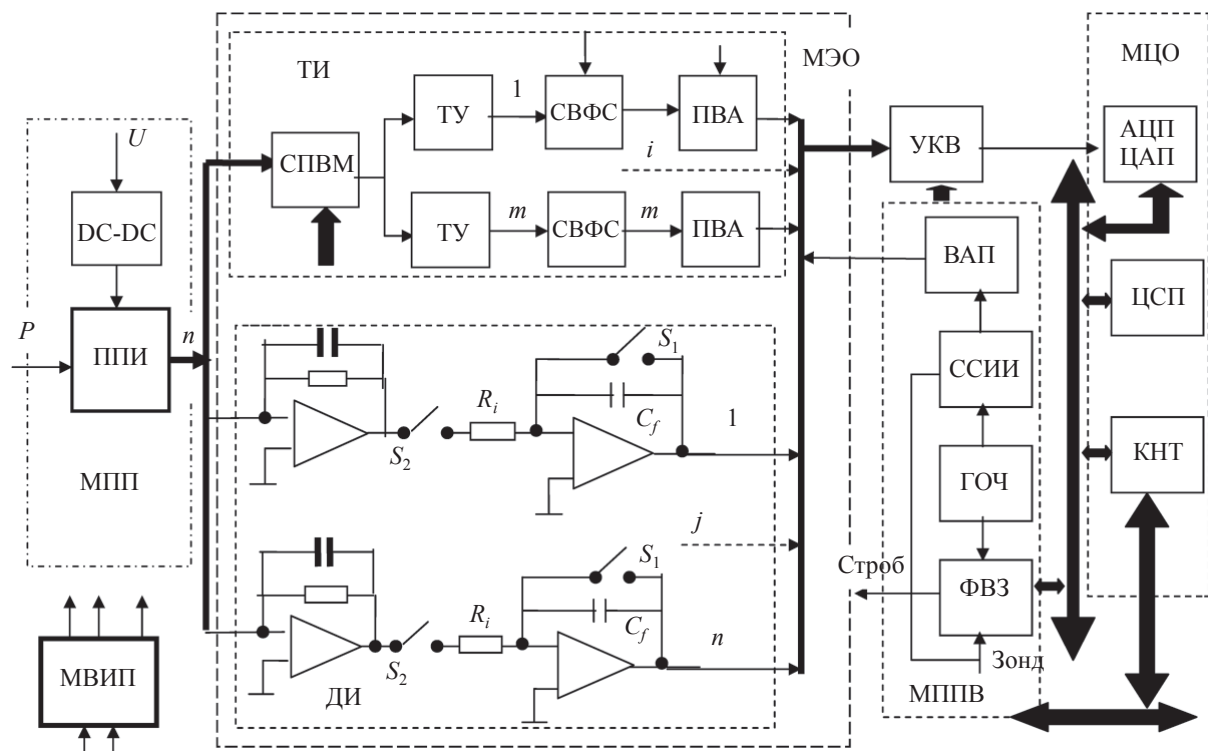


Рис. 2. Структурная схема устройства. Пояснения см. в тексте.

чувствительность канала. Длительность импульса на выходе зарядочувствительного усилителя составляет около 0,8 мкс. Стробуемый интегратор представляет собой двухфазную цепь с переключаемым конденсатором. За интервал экспозиции, соответствующий времени наблюдения T , замыкается ключ S_2 и регистрируется сигнал, отраженный от объекта. В цикле хранения оба ключа разомкнуты. При этом выходной сигнал интегратора запоминается на время считывания сигнала. При замыкании ключа S_1 (ключа сброса) происходит “сброс” аналогового сигнала. Выходы всех интеграторов подключены к устройству координатной выборки УКВ.

Схема электронной обработки трехмерного изображения является времяизмерительной – измеряет временной интервал между зондирующим и отраженным от объекта сигналами в тех элементах приемника, где был обнаружен сигнал. По принципу фиксации границ регистрируемого интервала преобразователь относится к стартстопному типу. Максимальную точность измерения временных интервалов, изменяющихся в широком диапазоне, обеспечивают двухшкальные преобразователи время–код комбинированного типа, основанные на сочетании прямого (счетно-импульсного) и косвенного (времяамплитудного) методов преобразований.

Зонами интерполяции являются временные интервалы между зондирующим (старт-импульсом) и следующим за ним импульсом опорного генератора ГОЧ, а также между передним фронтом строба дальности, формируемым модулем МППВ, и отра-

женным от объекта импульсом (стоп-импульсом). В МЗО преобразование второго интерполяционного интервала выполняют схема временной фиксации и стандартизации СВФС и времяамплитудный преобразователь ВАП.

Сущность времяамплитудного метода состоит в накоплении за измеряемый временной интервал заряда на накопительном конденсаторе с последующим определением напряжения на нем. Линеаризацию процесса заряда конденсатора обеспечивает генератор тока. Времяамплитудное преобразование является наиболее прецизионным, обладает пикосекундным разрешением, удовлетворительной линейностью и стабильностью.

СВФС измеряет временное положение импульсного сигнала на временной оси. В МЗО применен метод фиксации с абсолютным уровнем привязки, при котором в качестве оценки временного положения принимается момент пересечения входным воздействием заданного порогового уровня. Данный способ обладает минимальным “джиттером” и имеет простую схемную реализацию.

Систематическая погрешность схемы привязки приблизительно равна длительности фронта импульса. Для компенсации систематической погрешности измерения применен метод цифровой коррекции. Данный метод предполагает параллельный амплитудный анализ сигнала изображения, который в устройстве выполняет схема регистрации ДИ. Коррекция результатов измерений временных интервалов проводится в модуле процессорной обработки.

Схема электронной обработки ТИ выполнена масштабированной. Схема пространственной выборки и масштабирования СПВМ позволяет суммировать сигнал ППИ на входе трансимпедансного усилителя ТУ с нескольких соседних элементов матрицы с образованием элемента изображения большего размера. Масштабирование по дальности обеспечивает схема ПВА, крутизна преобразования которой может изменяться внешним сигналом управления.

На результат измерений ТИ влияют помехи, уровень которых зависит от используемых технических решений и топологии платы МЭО. Функционально интегрированная плата содержит высокочувствительные схемы преобразования тока первичного преобразователя и быстродействующие цифровые микросхемы, которые через паразитные емкости воздействуют на входные цепи. Многоканальная параллельная электронная обработка является источником перекрестных помех. При пороговой обработке трехмерного изображения коэффициент взаимосвязи не должен превышать 0,1%. Устранение влияния помех является одной из трудных задач многоканальной электронной обработки.

Схемы формирователя временной задержки ФВЗ и генератора опорной частоты ГОЧ (модуль МППВ) по входному коду проводят точную задержку строка дальности относительно импульса зонда. Схема селекции интервалов интерполяции ССИИ и времяамплитудный преобразователь ВАП осуществляют интерполяционное преобразование зоны неопределенности, возникающей в начале регистрируемого интервала. Стыковку результатов грубого и интерполяционного измерений выполняет модуль цифровой обработки (МЦО) изображения.

Измеренные данные аналогового сигнала двумерного и трехмерного изображений запоминаются в модуле электронной обработки. Сбор данных и последующую обработку сигнала в реальном времени осуществляет МЦО, который содержит цифровой сигнальный процессор ЦСП, программируемые логические интегральные схемы, аналого-цифровой преобразователь АЦП, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП и гальванически изолированный интерфейс для «общения» с главным процессором.

По сигналу готовности модуль формирует адреса, обеспечивающие доступ к аналоговой памяти. АЦП разрядностью 14 бит оцифровывает входные сигналы, которые записываются во внутреннюю память ЦСП. Целью последующей предварительной обработки изображения является минимизация систематических погрешностей измерения.

Коррекция двумерного изображения позволяет выравнять чувствительность отдельных пикселей, учесть зависимость регистрируемой интенсивности от

дальности и вычесть «пьедесталы», вызванные коммутационными помехами измерительных цепей. Точность измерения ТИ в наибольшей степени зависит от погрешности временной привязки. Для внесения поправки в результат обработки сигналов предварительно в память ЦСП записываются дискретные значения экспериментальной зависимости моментов фиксации от амплитуды импульса, по которой процессор определяет величину корректирующей поправки.

Результаты испытаний

Испытание трехмерного приемного устройства проводилось в составе лабораторного макета ладара. Конструктивно макет состоит из объектива, трехмерного приемника и лазерного излучателя для подсветки объекта. Объект относительно приемника располагался на расстоянии 10–15 м. В качестве первичного преобразователя изображения был применен многоэлементный ФЭУ.

В настоящее время испытаны на соответствие техническим требованиям функциональные узлы приемника. Чувствительность схемы регистрации ДИ равна 8×10^{11} В/К, среднеквадратичный шум считывания составляет примерно 240 электронов, нелинейность не превышает 0,1%.

Для схемы регистрации ТИ получены следующие результаты:

коэффициент преобразования 25 мВ/нс,
временное разрешение 5 пс,
диапазон измерений 10–200 нс,
нестабильность временной шкалы за 8 ч работы составляет 20 пс,
нелинейность не превышает 0,02%.

Полученные результаты обеспечивают измерение дальности с погрешностью в несколько сантиметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stann B.L., Aliberti K., Giza M., Ruff W., Stead M. Research progress on a focal plane array ladar system using a laser diode transmitter and FM/cw radar principles // Proc. SPIE. 2002. V. 4723. P. 19–30.
2. Burns H.N., Yun S.T. Compact, multichannel receiver using InGaAs APDs for single pulse, eye-safe, laser radar imagery // Proc. SPIE. 1997. V. 3065. P. 22–29.
3. Hutchinson J.A., Trussell C.W., Allik T.H., Hamlin S.J., Force J.D., Crawford I., McCarthy J.C., Bowers M.S., Jack M. Multifunction laser radar 111 // Proc. SPIE. 2001. V. 4337. P. 132–146.
4. Волков В.П., Глуховской Б.М., Охай В.П., Ярошенко И.Ф. Фотоэлектронный умножитель на микроканальных пластинах с линейкой дискретных анодов // ПТЭ. 1993. № 1. С. 184–188.