

## ОБЗОРНЫЙ АВТОДИННЫЙ РАДИОЛОКАТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, Ак. Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [ermak@ire.kharkov.ua](mailto:ermak@ire.kharkov.ua)*

Приведены результаты исследования обзорного локатора ближнего действия, разработанного на основе автодинного приемо-передающего устройства 8-мм диапазона длин волн с линейной модуляцией частоты и сканирующей антенной дифракционного излучения. Все функции формирования и спектральной обработки сигналов, а также управления сканированием луча антенны выполнялись с помощью цифрового сигнального процессора. Передача команд управления и сигналов с выхода локатора осуществлялась по радиоканалу IEEE 802.11b. Ил. 10. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** обзорный автодинный радиолокатор, миллиметровый диапазон, линейная модуляция частоты, цифровая обработка сигналов.

Обзорные радиолокаторы ближнего радиуса действия, способные выявлять объекты на расстояниях от единиц до сотен метров, необходимы для обнаружения людей и препятствий в условиях плохой видимости и для обеспечения безопасности движения транспортных средств.

В таких локаторах широко используются гомодинные схемы построения приемо-передающих устройств (ППУ) с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [1]. Также, для этих задач возможно применение и автодинных ППУ [2–4]. Такие устройства предполагают дальнейшее упрощение конструкции и стоимости локаторов ближнего действия.

Принцип работы автодинных приемо-передающих систем основан на измерении изменений амплитуды, частоты или рабочего тока автогенератора при воздействии на него сигнала, отраженного от объекта. Эти режимные изменения колебаний генератора определяются набегом фазы  $\delta(t, \tau)$  отраженного излучения, которая в свою очередь зависит от текущей частоты  $\omega(t)$  этого же излучения. В этом состоит суть автодинного эффекта, который проявляется во всех типах генераторов и во всем диапазоне частот, и его отличие от реакции смесителя, применяемого в гомодинных системах [3].

При отражении сигнала автодина от движущегося объекта частота автодинного сигнала равна частоте Доплера. В связи с этим наиболее широкое применение автодины нашли в системах ближней радиолокации для измерения скорости и обнаружения подвижных объектов.

Учитывая, что автодины, так же как и гомодины, относятся к классу приемо-передающих систем с «нулевой» промежуточной частотой, их чувствительность в режиме непрерывного излучения ограничивается уровнем шумов автогенератора, которые возрастают вблизи несущей частоты генератора. Для повышения потенциала

и возможности измерения дальности необходимо повышать чувствительность автодина и применять модуляцию частоты автогенераторов.

Для ЛЧМ дальнометрических систем ближнего действия наиболее подходящими источниками сигнала являются генераторы на основе диодов Ганна с варакторной перестройкой частоты, которые характеризуются низким уровнем шума, малыми габаритами и простотой конструкции.

В работах [2–5] приведены результаты исследования автодинов на диодах Ганна с частотной модуляцией, для которой использовались сигналы, подаваемые на варикап, установленный в генераторную камеру. Автодинный отклик по изменению автосмещения снимался через специальный блок выделения автодинного сигнала, который осуществляет преобразование автодинных изменений среднего значения тока диода Ганна в напряжение.

Введение источника модулирующего напряжения приводит к изменению мгновенной частоты, амплитуды автоколебаний, напряжения автосмещения, а также фазового набега электромагнитной волны, отраженной от цели. Выражение для автосмещения  $a_0$ , полученное в работе [3] в приближении квазистатического режима автодина, т. е. без учета переходных процессов установления автодинных откликов, имеет вид

$$a_0 = H_{\text{в}} K_{\text{ов}} f_{\text{м}}(t) + \Gamma(t, \tau) K_0 \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0],$$

где  $H_{\text{в}}$ ,  $K_{\text{ов}}$  – коэффициенты преобразования изменений частоты в изменения автосмещения и амплитуды колебаний генератора при модуляции частоты изменением напряжения на варикапе;  $f_{\text{м}}(t)$  – нормированная модулирующая функция, имеющая период  $T_{\text{м}} = 2\pi / \Omega_{\text{м}}$ ;  $\Gamma(t, \tau) = \Gamma[A(t, \tau) / A(t)]$  – модуль мгновенного коэффициента отражения, приведенный к выход-

ным «зажимам» генератора;  $\Gamma = (P_c / P_{изл})^{1/2}$  – коэффициент, характеризующий степень затухания излучения при его распространении до объекта и обратно;  $P_c$ ,  $P_{изл}$  – мощности отраженного и излученного колебаний на внешней нагрузке генератора соответственно;  $K_0$  – коэффициент автодетектирования;  $\delta(t, \tau)$  – мгновенная разность фаз колебаний в текущий момент времени и отраженного излучения, вернувшегося от отражающего объекта через время запаздывания;  $\psi_0$  – фазовый угол смещения автодинного отклика. Выражения для величин  $H_v$ ,  $K_{0v}$ ,  $K_0$  есть в работе [3].

Из приведенного выражения видно, что при модуляции частоты автодинного генератора изменением напряжения на варикапе и одновременном воздействии отраженного излучения его отклик по изменению автосмещения кроме полезного сигнала (второе слагаемое), содержит также составляющие (паразитной) амплитудной модуляции (ПАМ) (первое слагаемое), повторяющее закон модуляции  $H_v K_{0v} f_m(t)$ . В полезной составляющей отклика заключена информация о дальности до отражающего объекта и его скорости относительно локатора. Составляющая ПАМ теоретически не оказывает влияния на полезный сигнал (второе слагаемое), но в реальных условиях работы создает серьезные проблемы для достижения предельных технических параметров автодинных локаторов с частотной модуляцией (ЧМ). Уровень составляющей ПАМ может значительно превышать полезные автодинные изменения параметров автоколебаний генератора, что значительно сужает динамический диапазон системы и затрудняет последующую обработку полезного сигнала.

Очевидно, в связи с этим в работах [2, 3] по исследованию автодинов с ЛЧМ не были приведены результаты применения таких устройств для измерения дальности, однако было показано, что применение ЧМ в автодинах позволяет существенно (до 10 раз) увеличить потенциал таких приемо-передающих систем.

Одним из путей решения этой проблемы является применение методов цифровой обработки и формирования сигналов.

На базе автодинного ППУ, исследованного в работах [4, 5], была разработана схема и проведены исследования лабораторного образца обзорного локатора с ЛЧМ 8-мм диапазона длин волн со сканирующей антенной дифракционного излучения. В локаторе все функции формирования и спектральной обработки сигналов и управления сканирования луча антенны осуществлялись с помощью цифрового сигнального процессора (ЦСП).

### Экспериментальные исследования.

Структурная схема обзорного автодинного локатора приведена на рис. 1: 1 – антенная система; 2 – генератор автодинного типа на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты; 3 – усилитель; 4 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 5 – датчик тока в цепи питания генератора; 6 – полосовой фильтр; 7 – усилитель разностной частоты; 8 – блок питания; 15 – шаговый двигатель; 16 – контролер шагового двигателя; ЦСП в состав которого входят: 14 – порт ввода-вывода общего назначения; 13 – коммуникационный последовательный порт, 12 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 11 – универсальный асинхронный приемопередатчик (УАПП), который можно подключить к персональному компьютеру (ПК) 9, через преобразователь интерфейсов 10.

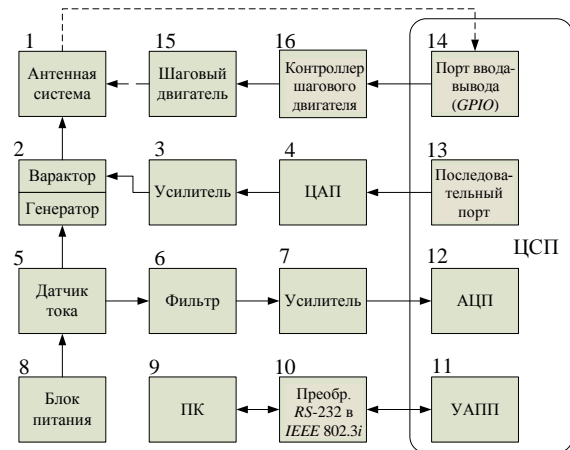


Рис. 1. Структурная схема обзорного автодинного локатора

ЦСП выполняет функции управления системами локатора, формирования излучаемого и первичной обработки принятого сигналов.

Нами был выбран цифровой сигнальный процессор *TMS320F2808* фирмы *Texas Instrument*. Данный процессор при относительно невысокой цене обладает достаточной для нашей задачи производительностью, высокой стабильностью работы и широким температурным диапазоном работы. В составе сигнального процессора использованы блоки, отвечающие за выполнение следующих функций:

- АЦП, предназначенный для оцифровки сигнала разностной частоты ( $F_p$ );
- приемопередатчик шины *SPI*, управляющий работой ЦАП;
- приемопередатчик шины *SCI*, который осуществляет обмен информацией с блоком индикации и управления;

- порт ввода-вывода общего назначения служит для управления шаговым двигателем, устанавливающим положение луча антенной системы;
- высокоскоростное вычислительное ядро, выполняющее все функции цифровой обработки сигнала: спектральный анализ, цифровую фильтрацию сигнала и формирование данных для индикации.

ЦАП 4 предназначен для перестройки частоты генератора Ганна путем формирования пилообразного напряжения, которое после усиления подается на варактор 2, модулирующий частоту генерации генератора Ганна. Применялась ЛЧМ, изменяющаяся по несимметричному пилообразному закону.

На рис. 2 приведена фотография печатной платы блока управления и обработки сигнала автодинного приемопередатчика.

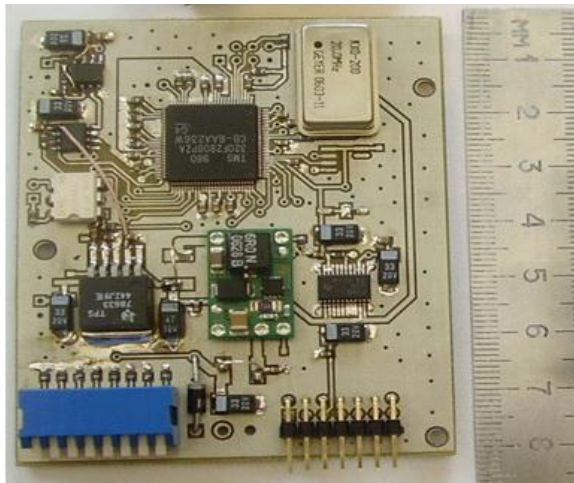


Рис. 2. Печатная плата блока управления и обработки сигнала автодинного приемопередатчика

Алгоритм работы вычислительного ядра, представленный на рис. 3, включает следующие функции и команды:

- «Инициализация» – настройка периферийных устройств ЦСП, распределение внутренней памяти, установка значений внутренних переменных, копирование исполняемого кода из низкопроизводительного ПЗУ в высокопроизводительное ОЗУ [4];
- «Установка нового значения пилообразного напряжения» – выдача на ЦАП очередного цифрового кода;
- «Выборка из АЦП и сохранение результата в память» – оцифровка входного сигнала и формирование массива данных в памяти ЦСП.
- «Фильтрация ВЧ» – улучшение характеристик сигнала при помощи алгоритмов цифровой обработки сигналов;
- «БПФ» – быстрое преобразование Фурье, реализовано на основе стандартной библиотеки

функций, оптимизированной для используемого нами вычислительного ядра;

- «Анализ результата» – анализ результата фурье-преобразования и принятие решения в зависимости от результата;

- «Индикация результата» – отправка полученного фурье-спектра на индикацию.



Рис. 3. Алгоритм работы ЦСП

Алгоритм формирования управляющего сигнала состоит в следующем. К управляющему электроду варакторного диода прикладывается пилообразное напряжение, формируемое в ЦСП путем передачи цифрового кода, соответствующего очередному значению амплитуды управляющего сигнала пилообразной формы, в управляющий регистр ЦАП через последовательный интерфейс 13. ЦАП, получив очередной цифровой код, устанавливает на своем аналоговом выходе напряжение, соответствующее этому цифровому коду. Далее напряжение с выхода ЦАП через усилитель и фильтр нижних частот (ФНЧ) поступает на варактор, перестраивая частоту генератора.

Формируемый таким образом линейно частотно-модулированный радиосигнал излучается антенной системой приемопередающего модуля. Сигнал, отраженный от объекта, попадает обратно в генератор. Автодинный эффект регистрируется ВЧ-датчиком тока, измеряющим изменение тока в цепи питания генератора Ганна. Сигнал с датчика тока после фильтрации и усиления поступает на АЦП ЦСП.

Вычислительным ядром ЦСП производится цифровая обработка сигнала (фильтрация и фурье-анализ), результаты которой передаются через УАПЧ 11 на ПК 9, используемый в качестве системы отображения радиолокационной информации. Помимо этого, ЦСП также управляет антенной системой 1 путем подачи управляющих импульсов через универсальный порт ввода-вывода 14 на драйвер шагового двигателя 15.

Когда в диаграмме направленности антенной системы локатора находится неподвижный отражающий объект, в одном из фильтров анализатора спектра будет наблюдаться сигнал, амплитуда которого характеризует отражающую способность наблюдаемого объекта, а номер фильтра, в котором наблюдается сигнал, характеризует дистанцию от локатора до объекта. Аналогичная ситуация будет в случае наблюдения двух и более объектов. В этом случае каждому из отражателей будет соответствовать своя спектральная составляющая.

Спектр сигнала автодина, в отличие от сигнала гомодина, содержит как высшие гармоники и постоянную составляющую, так и составляющие, кратные частоте модуляции. При завершении цикла модуляции формируется крутой скачок амплитуды отклика, имеющий широкий спектр гармоник, кратных частоте модуляции, подавление которых при обработке сигнала представляет определенную проблему [3].

Для исключения из спектра принятого сигнала паразитных компонент, обусловленных скачком амплитуды отклика, при обработке сигнала в приемопередатчике используется только часть диапазона перестройки генератора 2, свободная от переходных процессов. Это реализуется путем исключения данных, содержащих переходные процессы из анализа сигнала.

Для исключения из спектра принятого сигнала компонент, связанных с ПАМ, и отражений от ближних объектов, информация от которых не представляет интереса, перед преобразованием Фурье применяется предварительная фильтрация. Фильтрация реализована следующим образом: к исходному сигналу применяется «скользящее среднее» [6], которое выступает в качестве фильтра нижних частот. После выделения низкочастотная составляющая вычитается из исходного сигнала, и на выходе фильтра остается только высокочастотная составляющая, которая содержит информацию об отражениях из заданного диапазона дальностей.

Результат применения такой обработки приведен на рис. 4, максимумы на частотах 5 и 10 кГц соответствуют двум неподвижным отражателям, установленным на расстояниях 2 и 4 м. Следующие за ними максимумы обусловлены шумами и переотражениями в помещении.

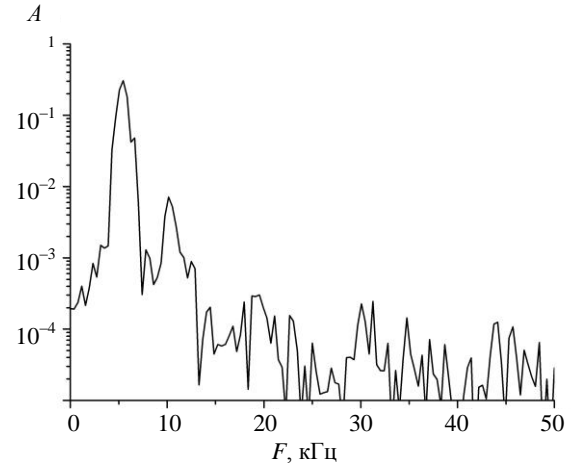


Рис. 4. Спектр сигнала разностной частоты с применением цифровой обработки

Для сравнения на рис. 5 изображен спектр сигнала, к которому не применялась процедура фильтрации. Следует обратить внимание, что уровень отношения сигнал-шум в спектре сигнала без предварительной фильтрации значительно хуже, чем спектр сигнала после фильтрации. Кроме того, в нем не проявляются составляющие, вызванные переотражениями от стен помещения. Измерения проводились в неидеальных условиях: в помещении, при наличии двух сильно отражающих и большого количества слабо отражающих объектов.

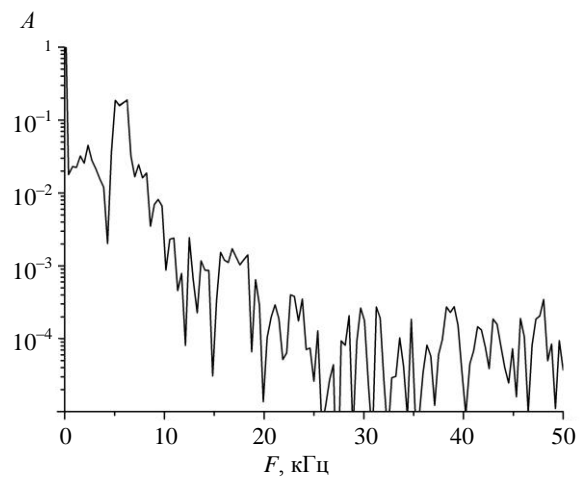


Рис. 5. Спектр сигнала разностной частоты без применения цифровой обработки

К отфильтрованному сигналу применялось быстрое преобразование Фурье (БПФ) по алгоритму «Radix2» с применением оконной функции Хеннинга. После применения БПФ в полученном спектре присутствуют только составляющие, связанные с отражениями от объектов.

Для дальнейшего улучшения характеристик сигнала проводилось накопление спектра

сигнала. На рис. 6 приведен спектр сигнала разностной частоты с применением цифровой обработки и накоплением. Как видно, процедура накопления позволила повысить отношение сигнал-шум и выделить переотражения сигнала в помещении, где проводились измерения (максимумы на частотах 17 и 27 кГц).

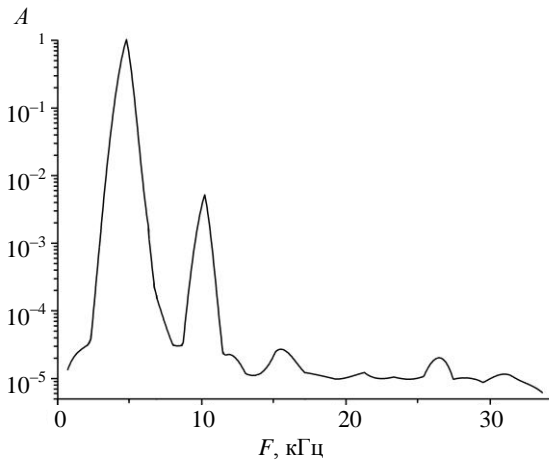


Рис. 6. Спектр сигнала разностной частоты с применением цифровой обработки и многократным накоплением сигнала

На рис. 7 изображен спектр автодинного отклика от двух близко расположенных угловых отражателей с разной отражающей способностью. Как видно, амплитуда автодинного отклика для разных угловых отражателей имеет различное значение, так как более близкий отражатель имеет меньший коэффициент отражения. Отражатели находились вдоль трассы распространения сигнала. Рис. 7 иллюстрирует разрешающую способность автодинного радиолокатора, которая является минимальным расстоянием между двумя целями, которые можно различить. В нашем случае разрешающая способность составляла 60 см.

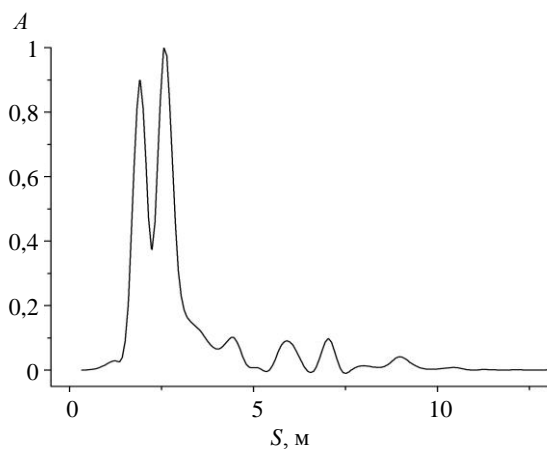


Рис. 7. Спектр выходного сигнала локатора при отражении от двух близко расположенных отражателей с разными коэффициентами отражения

Таким образом, использование цифровой обработки и формирования сигнала позволило исключить паразитные компоненты в выходном спектре автодинного приемопередатчика, что сделало возможным проводить измерение дальности до объектов.

В качестве антенной системы локатора использовалась планарная сканирующая антенна дифракционного излучения [6–8]. В антенне, фото которой приведено на рис. 8, реализован электро-механический принцип сканирования луча в пределах до  $120^\circ$ . Сканирование осуществляется за счет поворота диска с дифракционной решеткой в поле планарного диэлектрического облучателя с помощью шагового двигателя. Антенна обеспечивает линейную поляризацию излучения при КСВН не хуже 1,25. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскости  $2,2^\circ$ , потери 0,7 дБ, диаметр апертуры 250 мм.

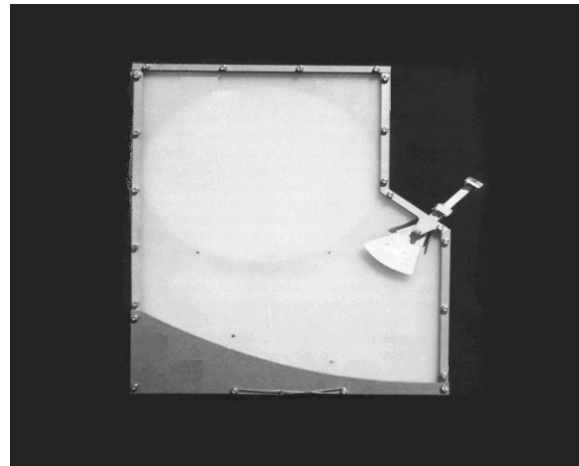


Рис. 8. Планарная сканирующая антенна

Преимуществом применения таких антенн в обзорных локаторах является малый размер вдоль оси излучения и отсутствие вращающегося сочленения для передачи излучаемых и принимаемых сигналов.

Макет автодинного обзорного радиолокатора был выполнен на основе конструкции сканирующей антенны, апертура которой была направлена в сторону сектора обзора. Шаговый двигатель, управляющий углом сканирования луча антенны, автодинный ППУ и блок управления и обработки сигналов располагались с тыльной стороны антенны.

Для связи радиолокатора с пунктом управления и обработки полученной информации был использован стандарт передачи данных *IEEE 802.3i*, дополненный стандартом передачи данных по радиоканалу *IEEE 802.11b* с дальностью действия до 300 м. Ввиду малости по-

требления энергии, питание радиолокатора осуществлялось от аккумуляторной батареи.

Условия проведения испытаний представлены на рис. 9. Радиолокатор устанавливался на крыше 2-этажного здания таким образом, что при сканировании луч диаграммы направленности скользил над поверхностью крыши здания. В секторе обзора локатора располагалось несколько объектов: уголкового отражателя 1, выходы вентиляционных шахт 2, расположенные на крыше здания, и два здания разной этажности 3, 4.

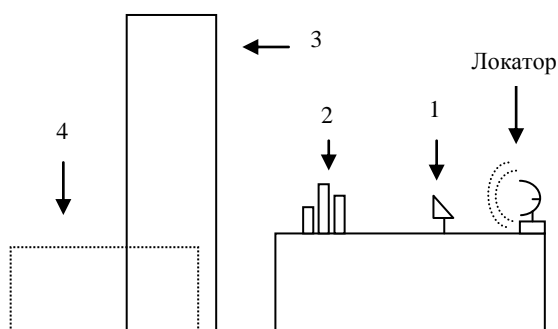


Рис. 9. Условия проведения испытаний

На рис. 10 представлено радиолокационное изображение на экране персонального компьютера, полученное в результате испытаний автодинного радиолокатора, цифрами обозначены отклики от объектов: 1 – уголкового отражателя, расположенный на расстоянии 20 м; 2 – выходы вентиляционных шахт расположенные на крыше здания; 3 – 5-этажное здание, расположенное на расстоянии 100 м; 4 – отклик от 2-этажного здания, расположенного по азимуту – 20° градусов от нормали антенной системы.

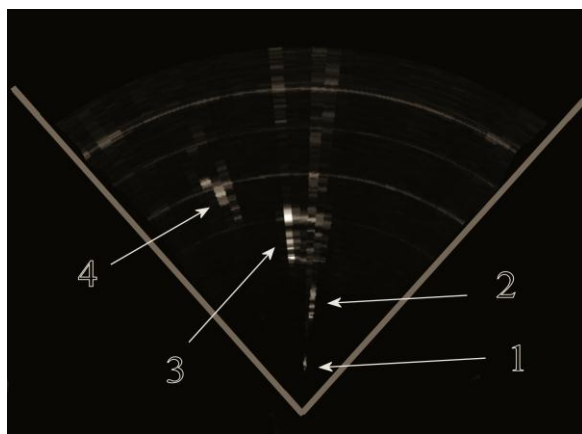


Рис. 10. Изображение на дисплее системы отображения радиолокационной информации

**Выводы.** Таким образом, нами разработана схема и исследован макетный образец об-

зорного радиолокатора 8-мм диапазона на основе автодинного приемо-передающего модуля с ЛЧМ и планарной сканирующей антенны дифракционного излучения, предназначенного для обнаружения объектов на дальностях от единиц до сотен метров.

В радиолокаторе реализованы цифровые методы формирования излучаемого сигнала и синхронного приема, спектральной обработки и цифровой фильтрации сигнала разностной частоты. Обладая высокой скоростью обработки, эти методы позволяют упростить структурную схему локатора при одновременном улучшении разрешающей способности и расширении его функциональных возможностей. Использование цифровой обработки и формирования сигнала позволило исключить составляющие паразитной амплитудной модуляции в выходном спектре автодинного приемопередатчика, что сделало возможным проводить измерение дальности до объектов.

В локаторе все функции формирования и спектральной обработки сигналов и управления сканирования луча антенны осуществлялись с помощью одного ЦСП. Передача команд управления и сигналов с выхода локатора осуществлялась по радиоканалу.

1. Комаров И. В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И. В. Комаров, С. М. Смольский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 392 с.
2. Закарлюк Н. М. Спектр автодинного отклика генератора с частотной модуляцией / Н. М. Закарлюк // Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН Украины. – Х., 1992. – С. 56–65.
3. Воторопин С. Д. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией / С. Д. Воторопин, В. Я. Носков, С. М. Смольский // Успехи современной радиоэлектрон. – 2009. – № 3 – С. 3–50.
4. Варавин А. В. Автодинный приемо-передающий модуль на диоде Ганна с внутренним детектированием сигнала для радиолокационного датчика с линейной модуляцией частоты / А. В. Варавин, А. С. Васильев, Г. П. Ермак, И. В. Попов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 3. – С. 546–551.
5. Варавин А. В. Автодинный радиолокатор миллиметрового диапазона с линейной модуляцией частоты / А. В. Варавин, А. С. Васильев, Г. П. Ермак, И. В. Попов // Proc. of 18th International Crimian Conference on Microwaves and Telecommunication Technology. – Sevastopol, 2008. – P. 807–808.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: «Питер», 2007. – 751 с.
7. Евдокимов А. П. Новое направление в технике антенных решеток / А. П. Евдокимов, В. В. Крыжановский // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 1996. – 39, № 9–10. – С. 54–61.
8. Обзорный автодинный радиолокатор миллиметрового диапазона / Г. П. Ермак, А. В. Варавин, А. С. Васильев и др. // Proc. of 19th International Crimian Conference on Microwaves and Telecommunication Technology. – Sevastopol, 2009. – P. 821–822.

G. P. Ermak, A. V. Varavin, A. S. Vasilev,  
I. V. Popov, A. P. Evdokimov,  
V. V. Kryzanovsky

AUTODYNE MILLIMETER BAND  
SURVEILLANCE  
RADAR

The research results of short-range surveillance radar designed on the basis of Ka- band FMCW autodyne transceiver with scanning antenna of diffraction radiation are presented. All the functions of forming and spectral signal processing and controlling the scanning of antenna beam were carried out by means of digital signal processor. The transmission of control commands and signals from radar was carried out through radio channel IEEE 802.11b.

**Key words:** surveillance autodyne radar, mm wave band, FMCW, digital signal processing.

Г. П. Єрмак, А. В. Варавін, О. С. Васильєв,  
І. В. Попов, А. П. Євдокімов,  
В. В. Крижановський

ОГЛЯДОВИЙ АВТОДИННИЙ  
РАДІОЛОКАТОР МІЛІМЕТРОВОГО  
ДІАПАЗОНУ

Наведено результати дослідження оглядового лока-тора ближньої дії, що розроблений на основі автодинного приймально-передавального модуля 8-мм діапазону з лінійною модуляцією частоти й скануючою антеною дифракційного випромінювання. Усі функції формування та спектральної обробки сигналів, а також керування скануванням променя антени виконувалися за допомогою цифрового сигнального процесора. Передача команд керування й сигналів з виходу локатора здійснювалася по радіоканалу IEEE 802.11b.

**Ключові слова:** оглядовий автодинний радіолока-тор, міліметровий діапазон, лінійна модуляція частоти, цифрова обробка сигналів.

*Рукопись поступила 14.07.10 г.*