

## 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

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. А. Я. Усикова*

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: [ermak@ire.kharkov.ua](mailto:ermak@ire.kharkov.ua)

Приведены результаты исследования автодинного приемно-передающего модуля 8-мм диапазона для радиолокационного датчика с линейной модуляцией частоты ближнего радиуса действия, предназначенного для измерения дальности и скорости объектов. Автодинный приемно-передающий модуль выполнен на основе диода Ганна с варакторной перестройкой частоты. Внутреннее детектирование сигнала осуществляется с помощью датчика тока в цепи питания диода Ганна. В приемно-передающем модуле реализованы методы цифрового формирования излучаемого сигнала, спектральной обработки и цифровой фильтрации сигнала разностной частоты. Ил. 7. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** автодинный приемопередатчик, мм диапазон, линейная модуляция частоты, цифровая обработка сигналов.

Приемо-передающие системы автодинного типа имеют наиболее простую конструкцию. Основным элементом таких устройств является автогенератор, работающий в режиме излучения и приема собственных колебаний, отраженных от исследуемого объекта.

Принцип работы автодинных приемно-передающих систем основан на изменении амплитуды, частоты и рабочего тока автогенератора при воздействии на него отраженного сигнала. Регистрация амплитудного и частотного откликов осуществляется с помощью внешних приемных устройств, связанных с приемно-передающим трактом через направленный ответвитель, а регистрация приращений рабочего тока производится в цепи питания автогенератора с помощью датчиков тока.

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

Основными признаками автодинов, отличающими их от гомодинных и супергетеродинных систем, являются наличие в них автодинного усиления принимаемых сигналов и возможность детектирования сигналов в цепи питания автогенератора. Автодинное усиление возникает в результате реакции нелинейного элемента генератора на внешний когерентный сигнал. Величина усиления определяется коэффициентом автодинного усиления  $K_a = A_{авт}/A_c$ , показывающем во сколько раз амплитуда автодинного отклика больше амплитуды принимаемого сигнала [1].

В настоящее время исследованы автодинные системы практически на всех типах автогенераторов: вакуумных, полупроводниковых и оптических. Одними из наиболее широко приме-

няемых автодинных датчиков мм диапазона являются автодины на основе диодов Ганна. Их характеризуют низкий уровень шума, высокие значения коэффициентов автодинного усиления, малые габариты и простота конструкции.

На их основе разработаны датчики предотвращения столкновения автомобилей и подъемных кранов, измерители скорости, охранные системы и другие датчики ближнего действия [2].

Дальнейшее развитие автодинных систем связано с поиском методов повышения их потенциала и возможности измерения дальности до объекта.

В связи с тем, что автодины, так же как и гомодины, относятся к классу приемно-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 амплитуды или частоты автогенераторов.

В работе [3] приведены результаты исследования автодинов на диодах Ганна с частотной модуляцией. В экспериментах использовались автодинные генераторы на диодах Ганна 8-мм диапазона с частотной модуляцией по цепи питания. Автодинный сигнал снимался с резистора, включенного в цепь питания диода Ганна. Доплеровский сдвиг частоты создавался при отражении сигнала от механического доплеровского имитатора [4] или имитатора, собранного на основе динамика низкой частоты [5]. Для модуляции частоты автодина использовались сигналы, изменяющиеся по закону  $E_m(t) = E_m \cos \Omega_m t$ .

Введение источника модулирующего напряжения приводит к изменению мгновенной

частоты  $\omega$ , амплитуды  $A$  автоколебаний, напряжения автосмещения  $U_0$ , а также фазового набега  $\delta = \omega t$  электромагнитной волны, отраженной от цели. Выражение для автосмещения  $U_0$ , полученное в работе [3] в приближении квазистатического режима автодина, т. е. без учета переходных процессов установления автодинных откликов, имеет вид

$$U_0 = A_m K_{om} \cos \Omega_M t + \Gamma K_0 \cos \delta, \quad (1)$$

где  $U_0 = \Delta U_0 / U_{o0}$  – коэффициент модуляции автосмещения;  $A_m = E_m / U_{o0}$  – коэффициент модуляции автодетектирования;  $K_{om} = S_1 / (S_1 - K S_2)(1 + R G_g)$  – коэффициент автодинного усиления в режиме модуляции;  $K_0 = 2 A_0 Q_H g_A R / U_{o0} Q_{ВН} (S_1 - K S_2)(1 + R G_g)$  – коэффициент автодинного усиления в режиме непрерывной генерации;  $\Gamma$  – коэффициент, учитывающий потери в приемо-передающем тракте;  $g_A$  – крутизна преобразования амплитуды СВЧ колебаний в изменение постоянной составляющей тока в цепи смещения;  $S_1$  – приведенная крутизна проводимости диода Ганна по амплитуде колебания;  $S_2$  – приведенная крутизна проводимости диода Ганна по напряжению смещения;  $K$  – внутренний коэффициент автодинного усиления;  $G_g$  – дифференциальная проводимость диода Ганна на низких частотах;  $R$  – внутреннее сопротивление источника питания;  $A_0$  – стационарное значение амплитуды колебаний;  $\Omega_M$  – частота модуляции. Выражения для величин  $S_1, S_2, S_3, K, g_A$  приведены в работе [5].

Из выражения (1) видно, что при частотной модуляции по цепи питания и одновременном воздействии отраженного сигнала автодин-

ный отклик, кроме полезного сигнала доплеровской частоты, содержит паразитную амплитудную модуляцию (ПАМ) значительного уровня, которая превышает уровень внутренних шумов и полезного сигнала на несколько порядков [6].

Из расчета спектров автодинного отклика, проведенного в работе [3], следует, что спектр автодинной системы с частотной модуляцией существенно сложнее спектра гомодинного радиолокатора с гармонической частотной модуляцией (ЧМ) [7] и отличается значительным уровнем паразитной амплитудной модуляции, наличием высших гармонических составляющих доплеровской частоты как в области низких частот, так и в окрестности гармоник частоты модуляции.

Этот эффект делает практически невозможным измерение дальности автодинами и приемо-передающими модулями, традиционно применяемыми методами в гомодинных локаляторах с ЧМ.

Очевидно, в связи с этим в работах [3, 4] по исследованию автодинов с ЧМ не были приведены результаты применения таких устройств для измерения дальности, однако было показано, что применение ЧМ модуляции 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.

В данной работе приведены результаты исследования возможности применения цифрового сигнального процессора для формирования и обработки сигнала в автодинном приемо-передающем модуле с линейной модуляцией частоты.

Структурная схема автодинного приемо-передающего модуля 8-мм диапазона с линейной модуляцией частоты представлена на рис. 1.

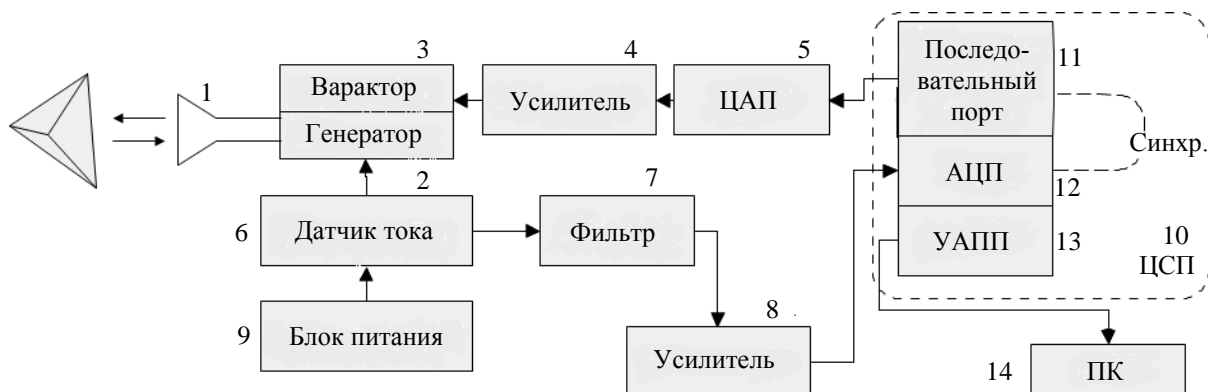


Рис. 1. Структурная схема автодинного приемо-передающего модуля с линейной модуляцией частоты

В его состав входят: 1 – антенная система, выполненная в виде рупорно-линзовой антенны; 2, 3 – генератор автодинного типа на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты; 4 – усилитель; 5 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 6 – датчик тока в цепи питания генератора; 7 – полосовой фильтр; 8 – усилитель разностной частоты; 9 – блок питания; 10 – цифровой сигнальный процессор (ЦСП). В состав сигнального процессора 10 входит коммуникационный последовательный порт 11, аналого-цифровой преобразователь 12 (АУП) и универсальный асинхронный приемопередатчик 13 (УАПП), который можно подключить к персональному компьютеру (ПК) 14.

На рис. 2, 3 приведены фотографии экспериментального образца автодинного приемопередающего модуля и печатной платы блока управления и обработки сигнала автодинного приемопередатчика.

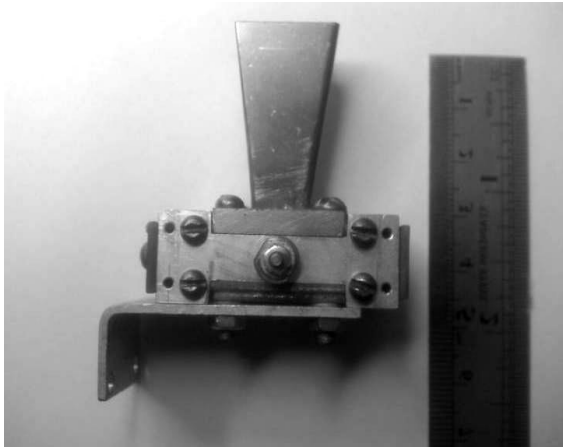


Рис. 2. Автодинный приемо-передающий модуль 8-мм диапазона на основе генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты

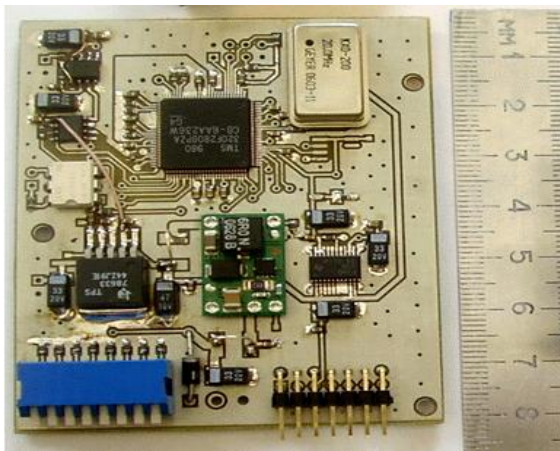


Рис. 3. Печатная плата блока управления и обработки сигнала автодинного приемопередатчика

На рис. 4 приведена фотография макета автодинного датчика в герметичном корпусе, габариты которого  $92 \times 92 \times 166$  мм.

ЦСП 10 выполняет функции управления системами радиолокационного датчика, формирования облучающего и обработки принятого сигналов.

Нами был выбран цифровой сигнальный процессор *TMS320F2808* фирмы *Texas Instrument*.



Рис. 4. Общий вид макета автодинного радиолокационного датчика 8-мм диапазона

Выбор был связан с тем, что 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 (*FP*);
- приемопередатчик шины *SPI*, управляющий работой ЦАП;
- приемопередатчик шины *SCI*, осуществляющий обмен информации с блоком индикации и управления;
- высокоскоростное вычислительное ядро, выполняющее все функции цифровой обработки сигнала: спектральный анализ, цифровую фильтрацию сигнала и формирование данных для индикации.

ЦАП 5 предназначен для перестройки частоты генератора Ганна путем формирования пилообразного напряжения, которое после усиления усилителем 4 подается на варактор 3, модулирующий частоту генерации генератора Ганна.

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 интерфейс *SPI*. 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 поступает на варактор, перестраивая частоту генератора.

Формируемый таким образом линейно частотно-модулированный радиосигнал излучается антенной системой приемо-передающего модуля. Сигнал, отраженный от объекта, например от уголкового отражателя, попадает обратно в генератор. Автодинный эффект регистрируется датчиком тока  $I$ , измеряющим изменение тока в цепи питания генератора Ганна. Сигнал с датчика тока после фильтрации и усиления поступает на АЦП 12 ЦСП 10. Когда в диаграмме направленности антенной системы локатора находится некоторый 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, а каждому из отражателей будет соответствовать своя спектральная составляющая.

Ограничения по измерению дальности до движущихся объектов связаны со временем обработки сигналов в ЦСП, которое для нашего случая составляет 1 мс. Например, при движении отражающего объекта со скоростью более 300 м/с произойдет уширение спектра сигнала отклика, что приведет к ухудшению разрешающей способности по дальности. При необходимости измерять расстояние до объектов, движущихся со скоростями более 300 м/с, следует использовать более производительные ЦСП.

Применение ЦСП позволило использовать модуль не только в режиме измерения дальности, но и в режиме измерения скорости. Для этого генератор переводится из ЧМ режима в режим непрерывной генерации.

Исследование потенциала и разрешающей способности по дальности автодинного приемо-передающего модуля проводилось как на стенде, где в качестве эквивалента трассы распространения использовались отрезок четырехметрового волновода с подвижным короткозамыкателем и волноводным аттенуатором, так и в полевых условиях, где в качестве отражающего объекта использовался уголкового отражатель.

В качестве индикатора выходного сигнала использовался ПК 14, который подключался к выходу радиолокационного приемопередатчика. На дисплее ПК отображались спектры автодинного отклика, амплитуда которых пропорциональна отражающей способности объекта и потерь на

трассе распространения сигнала, а частота пропорциональна дальности. Эти спектры использовались для измерения отношения сигнал – шум.

Измерения потенциала автодинного приемопередатчика проводились следующим образом. Известно, что потенциал приемопередающего устройства определяется отношением излучаемой мощности к минимально принимаемой при отношении сигнал – шум равным единице. Изменение потерь в тракте проводилось с помощью аттенуатора, а изменение расстояния до объекта проводилось путем изменения положения подвижного короткозамыкающего поршня.

На рис. 5 изображен график зависимости потенциала автодинного приемопередатчика от положения рабочей точки на вольтамперной характеристике генератора Ганна. С этой целью производилось изменение напряжения питания диода Ганна, и при каждом новом значении измерялся потенциал автодинного приемопередатчика. Как видно из графика, с повышением напряжения питания потенциал автодина монотонно возрастает, однако в связи с тем, что предельно допустимое напряжение питания для использованного нами диода Ганна составляет 4,5 В, измерение потенциала при более высоких напряжениях не проводилось.

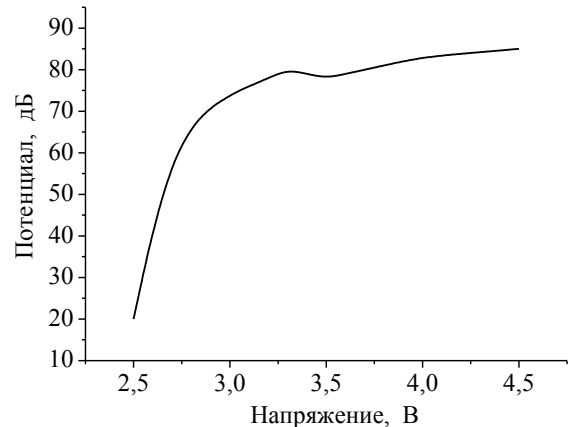


Рис. 5. Зависимость потенциала автодинного приемопередатчика от режима работы

На рис. 6 изображены спектры автодинного отклика, соответствующие трем положениям подвижного короткозамыкателя в волноводном тракте, каждое из которых отличается положением подвижного короткозамыкающего поршня в волноводном тракте на 30 см, соответствующим минимальной точности автодинного приемопередатчика с линейной модуляцией частоты при полосе перестройки частоты 500 МГц.

На рис. 7 изображен спектр автодинного отклика от двух близко расположенных уголко-

вых отражателей с разной отражающей способностью. Как видно из рисунка, амплитуда автодинного отклика для разных уголкового 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 составляет 60 см.

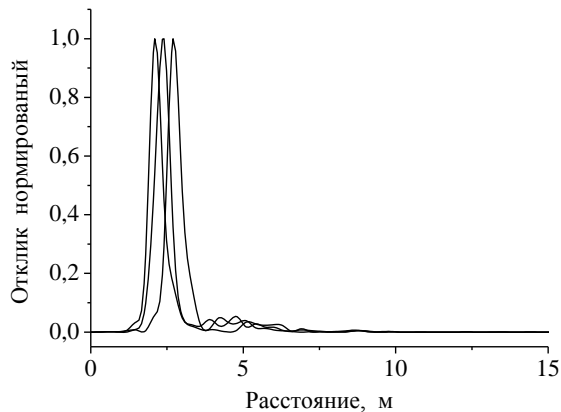


Рис. 6. Спектры сигналов отклика от короткозамыкателя, соответствующие трем его положениям с разностью в 0,3 м

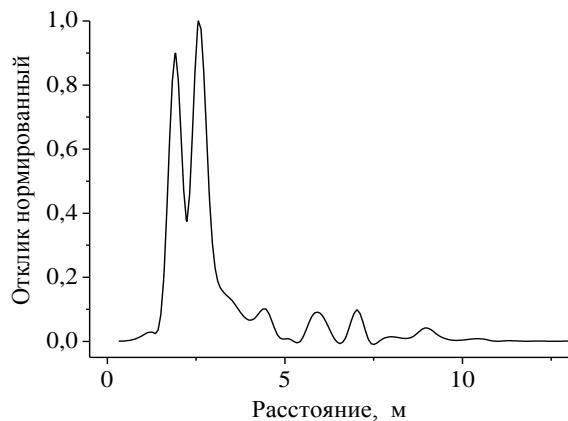


Рис. 7. Спектр выходного сигнала локатора при отражении от двух близко расположенных отражателей с разными коэффициентами отражения

Как видно из рис. 6 и 7, в спектре выходного сигнала отсутствуют компоненты, связанные с частотой модуляции автогенератора и ПАМ. Экспериментально показано, что применение цифровой обработки и формирования сигнала модуляции частоты генератора позволило решить задачу измерения дальности в автодинных приемо-передающих системах.

**Выводы.** Таким образом, нами, разработан и исследован автодинный приемопередатчик

8-мм диапазона с линейной модуляцией частоты с потенциалом < 85 дБ при выходной мощности 25 мВт. Разрешающая способность по дальности при полосе перестройки 500 МГц составляет 0,6 м, точность измерения дальности 0,3 м.

Использование цифровой обработки и формирования сигнала позволило исключить ПАМ в выходном спектре автодинного приемо-передатчика, что сделало возможным проводить измерение дальности и скорости объектов.

Автодинный приемо-передающий модуль может быть использован при разработке недорогих радиолокационных датчиков ближнего радиуса действия различного назначения: в автомобильных, противостолкновительных и охранных системах, в качестве датчиков промышленной автоматике и др.

1. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Исследование автодинных характеристик СВЧ генераторов на полупроводниковых диодах // Электронная техн. Сер. СВЧ-техника. – 1992. – № 7. – С. 24-30.
2. Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН Украины. – 1991. – С. 38-47.
3. Закарлюк Н. М. Спектр автодинного отклика генератора с частотной модуляцией // Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН Украины. – 1992. – С. 56-65.
4. Votoropin S. D., Ostapenkov P. S. and Smolsky S. M. Special features of practical measurement of parameters of promising frequency-modulated short-range millimeter radars // Russian Physics Journal. – 2006. – 49, No. 9. – P. 1012-1015.
5. Туманов Б. Н. Закарлюк Н. М. Фазовые портреты и особенности автоколебаний автодина на диоде Ганна // Электронная техн. Сер. Электроника СВЧ. – 1985. – № 10. – С. 6-13.
6. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. Analysis of operating regimes of EHF hybrid-integrated autodynes based on Gunn micropower mesaplanar diodes // Russian Physics Journal. – 2002. – 45, No. 2. – P. 150-162.
7. Коган И. М. Теоретические основы радиолокации на малых расстояниях // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. – М: ВИНТИ. – 1976. – № 13. – С. 156.

#### SELF-MIXING GUNN DIODE TRANSCIVER WITH INTERNAL DETECTION FOR A SHORT-RANGE RADAR SENSOR WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION

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

The work presents the results of a research on an 8-mm self-mixing transceiver for a short-range FMCW radar sensor with linear frequency modulation, designed for measuring distance and target's speed. The self-heterodyne transceiver is built on a Gunn diode with varactor frequency tuning. Internal detection is performed using a current sensor in the supply chain of the Gunn diode. Realized are the methods of digital signal generation, spectral processing and digital filtering.

**Key words:** FMCW self-mixing transceiver, Gunn diode, mm wave band, spectral processing, digital filtering.

**АВТОДИННИЙ ПРИЙМАЛЬНО-  
ПЕРЕДАВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ НА ДІОДІ ГАННА  
З ВНУТРІШНІМ ДЕТЕКТУВАННЯМ СИГНАЛУ  
ДЛЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ДАТЧИКА  
З ЛІНІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ЧАСТОТИ**

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

Приведено результати дослідження автодинного приймально-передавального модуля 8-мм діапазону для радіолокаційного датчика з лінійною модуляцією частоти ближ-

нього радіусу дії, призначеного для виміру дальності і швидкості об'єктів. Автодинний модуль виконаний на основі діода Ганна з варакторним перестроюванням частоти. Внутрішнє детектування сигналу здійснюється за допомогою датчика струму в колі живлення діода Ганна. У радіолокаційному датчику реалізовано методи цифрового формування випромінюваного сигналу, спектральної обробки і цифрової фільтрації сигналу різницевої частоти.

**Ключові слова:** автодинний приймально-передавальний модуль, мм діапазон, лінійна модуляція частоти, цифрова обробка сигналу.

*Рукопись поступила 18 июля 2008 г.*