

К. т. н. С. А. ШИЛО, к. т. н. В. М. ЧМИЛЬ,
к. т. н. В. А. БЕРЕЖНОЙ, к. т. н. Ю. Н. МУСЬКИН, Д. М. БЫЧКОВ,
А. С. ГАВРИЛЕНКО, В. И. КУЖЕЛЬ, А. С. ЛЕВДА, В. М. БЫКОВ

Дата поступления в редакцию
21.04 2003 г.

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие «Сатурн»;
г. Харьков, Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова
E-mail: chmil@jssaturn.kiev.ua, shilo@ire.kharkov.ua

Оппонент
к. ф.-м. н. В. Н. РАДЗИХОВСКИЙ
(г. Киев, ГП "Айсберг")

СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ЗІР» ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ТАМОЖЕННЫХ СЛУЖБ

Представлены результаты разработки и исследований многоканальной системы радиовидения "Зір" диапазона частот 86...100 ГГц.

В связи с ростом во многих странах опасности экстремизма и террористической деятельности неуклонно возрастает актуальность мер государственных органов, направленных на своевременное выявление и пресечение незаконного оборота оружия, взрывчатых и наркотических веществ, а также на усиление контролирующих функций, обеспечивающих безопасность граждан при проведении массовых мероприятий, поездов на транспорте, а также при охране объектов повышенной важности.

При решении таких задач одной из важных технических мер является организация эффективного дистанционного (бесконтактного) досмотра людей в пунктах специализированного контроля (на пограничных и таможенных постах и охраняемых объектах) и местах массового сосредоточения. Используемые в настоящее время инструментальные средства контроля имеют ряд ограничений, связанных либо с малой пропускной способностью, недостаточной дальностью действия, ограниченным набором детектируемых предметов (например, металлоискатели), либо с невозможностью их применения при массовом досмотре людей из-за негативных последствий (при генерации проникающих излучений в микроволновом и рентгеновском диапазонах спектра).

Электромагнитные волны миллиметрового диапазона, благодаря сравнительно низкому поглощению в тканях одежды, могут служить источником оперативной и дистанционно получаемой информации о наличии "неоднородностей" под одеждой человека, что при массовом досмотре может существенно сузить круг лиц, подвергаемых личному контролю. В качестве методов наблюдения наиболее перспективными следует считать пассивные методы радиовидения, основанные на приеме собственного радиотеплового излучения человека и не связанные с генерацией каких-либо полей и направленных излучений, способные оказать негативное воздействие на людей. При этом возможно обнаружение объектов из различных материалов неорганического и органического происхождения — металлов, керамики, пластических и порошковых материалов [1].

При разработке таких систем, по-видимому, должен быть найден компромисс между величиной проникающей способности и реализуемым пространственным и радиометрическим разрешением (т. е. между параметрами, противоположно зависящими от длины волны излучения) с учетом приемлемой сложности и стоимости таких систем контроля. Представляется, что с этих точек зрения близким к оптимальному является 3-мм-диапазон радиоволн.

К числу основных проблем, требующих решения при разработке систем радиовидения в рамках поставленной задачи, можно отнести необходимость получения изображений с периодом не более 1 с при обеспечении высоких значений пространственного и радиометрического разрешения. Эти задачи могут быть решены только за счет построения системы по многоканальной (многолучевой) схеме с параллельным (параллельно-последовательным) обзором пространства. При этом есть альтернатива:

- Создание двумерной или одномерной матрицы из N независимых приемных сверхвысокочастотных каналов, размещенной в фокальной плоскости приемной антенны, при фокусировке последней на заданное расстояние [2]. Каждый из каналов должен иметь свой антенный возбудитель и сверхвысокочастотный приемный тракт, а общее число независимых элементов изображения I будет определяться либо числом элементов в матрице $I=N$ (при неподвижной антенне), либо произведением числа элементов в матрице на число независимых угловых положений антенны M , $I=N \times M$ (при групповом сканировании лучами). К достоинствам этого метода можно отнести параллельный режим работы каналов при потенциально широкой полосе рабочих частот, что обеспечивает высокую радиометрическую чувствительность. Недостатками метода является повышенная стоимость системы из-за наличия большого числа приемо-преобразовательных модулей в миллиметровом диапазоне волн, а также сложность размещения матрицы приемных каналов в фокальной плоскости антенны и трудности управления пространственным положением ее лучей.

- Разделение диаграммы направленности антенны на несколько (N) примыкающих друг к другу лучей (например, за счет использования принципов частотного разделения) при совместной фокусировке этих лучей на поле наблюдения и синхронном механичес-

ком или электронном управлении положением такой диаграммы с целью обзора заданного пространства. В этом случае возможно формирование изображения по параллельно-последовательному принципу при наличии единственного сверхвысокочастотного приемного устройства [3], что существенно снижает общую стоимость системы. К недостаткам метода следует отнести меньшую полосу частот в каждом из каналов, следствием чего является сравнительно более низкая радиометрическая чувствительность.

С целью исследования потенциальных возможностей пассивных методов радиовидения в миллиметровом диапазоне волн в НПП «Сатурн», совместно с ИРЭ НАН Украины, проведена разработка экспериментального образца радиометрической системы «Зір», формирующей изображения в 3-мм-диапазоне радиоволн для использования таможенными и охранными службами.

В системе реализуется второй из указанных способов формирования изображений. Схема системы приведена на рис. 1, а. В качестве приемного раскрытия используется открытая электродинамическая структура с эффектом преобразования объемных электромагнитных волн в поверхностные, включающая в себя дифракционную решетку в виде диска и планарный диэлектрический волновод. Техническая реализация этого преобразования происходит в сканирующей антенне с электромеханическим управлением диаграммой направленности [4]. За счет того, что подобная электродинамическая структура обладает дисперсионными свойствами, по горизонтальной координате формируются $2N$ ($N=16$) независимых лучей антенны с частичным перекрытием соседних лучей (при использовании принципов частотного разделения направлений приема и расщеплении полной полосы рабочих частот системы Δf на $2N$ частично перекрывающихся полос Δf_{2n}).

Групповое возвратно-поступательное сканирование N лучами по вертикальной координате осуществляется за счет возвратно-поступательного поворота диска антенны с дифракционной решеткой вокруг своей оси с помощью прецизионного шагового привода при неизменном положении корпуса антенны.

Радиометрический приемник построен по N -канальной схеме обработки сигналов с общей антенной и сверхвысокочастотным трактом и двойным преобразованием частоты. Первое преобразование частоты осуществляется с использованием сигналов двух гетеродинов, попеременно подаваемых на смеситель в интервалы времени, соответствующие восходящей и нисходящей трассам сканирования лучей по вертикали. За счет этого осуществляется дополнительный мгновенный угловой сдвиг N -лучевой диаграммы направленности по азимутальному углу, в результате чего изображение формируется из двух примыкающих полукадров при общем числе элементов изображения по горизонтальной координате, равном 32. Схема формирования изображения приведена на рис. 1, б.

Второе преобразование частоты проводится в каждом из каналов обработки при отличающихся частотах вторых гетеродинов, в результате чего формируются смещенные по частотному диапазону полосы отдельных каналов. Радиометрический приемник построен по схеме полной мощности с периодической внешней абсолютной калибровкой [5]. С этой целью в верхней части поля наблюдения размещаются две распределенные калибровочные нагрузки из поглощающего материала; лучи антенны пересекают нагрузки в каждом полуцикле сканирования. Одна из нагрузок имеет температуру окружающего воздуха, а вторая подогревается с помощью активного нагревателя до температуры порядка 65°C . В результате этого создается калибровочный перепад излучения, позволяющий при обработке сигналов в ЭВМ отразить выходные сигналы каналов в шкале температур

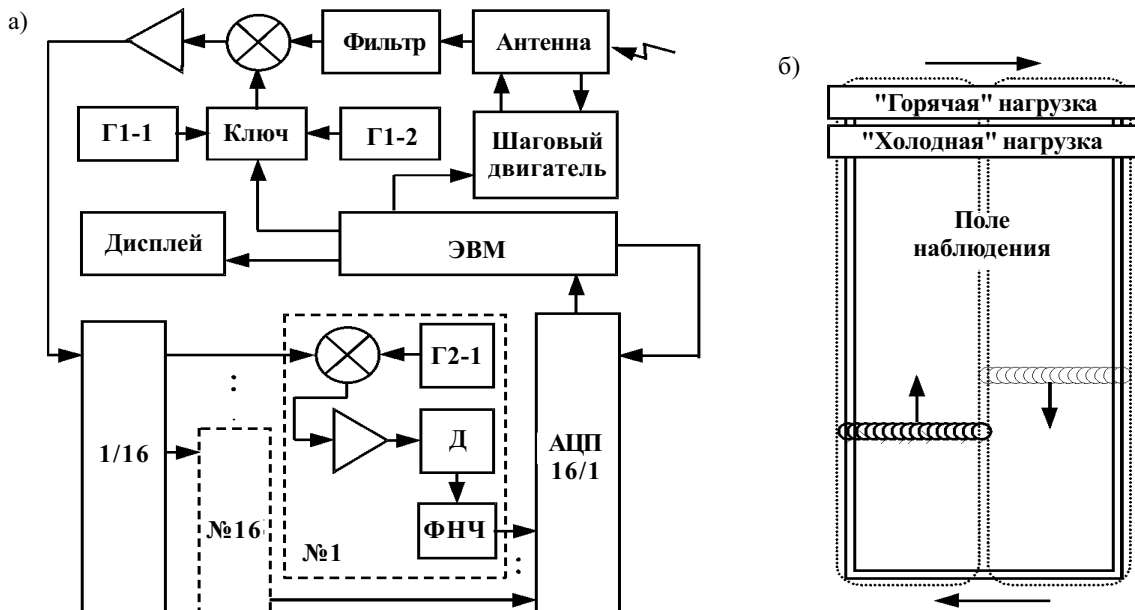


Рис. 1. Функциональная схема радиометрической системы (а), схема формирования изображения (б): Г1-1 — первый гетеродин № 1; Г1-2 — первый гетеродин № 2; Г2-1 — второй гетеродин № 1; Д — квадратичный детектор; 1/16 — делитель мощности на 16 идентичных каналов; АЦП 16/1 — 16-канальный АЦП

СВЧ-СИСТЕМЫ

Основные параметры экспериментального образца радиометрической системы «Зір»

Параметр		Значение	Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот		86,0—100,0 ГГц	Количество каналов	16
Диапазон ПЧ1		7,0—14,2 ГГц	Полоса частот канала	±(10,0—370,0) МГц
Размеры поля наблюдения: — рабочее поле наблюдения — полное поле наблюдения		1,0×2,0 м 1,0×2,4 м	Пространственное разрешение — диаграммное (уровень –3 дБ) — с учетом перекрытия лучей	70×55 мм ~35×35 мм
Ширина сектора обзора	угол места	35°	Шумовая температура приемника	≤2400 К
	азимут	11,5°		
Размер апертуры антенны		300 мм	Радиометрическое разрешение	≤ 3,5 К
Потери в антенне		–1,5 дБ	Диапазон измерений	300±50 К
Период сканирования		1 с (2×0,5 с)	Время интегрирования	5 мс
Дистанция		3,75 м	Поляризация	Горизонтальная ±10°

и, тем самым, компенсировать различия между каналами по усилению и выходному уровню, т. е. выровнять шкалы яркости и контрастности в различных столбцах матрицы изображения.

Распределенные температуры нагрузок измеряются с помощью сети термодатчиков, подключенных к электронному термометру, циклически вводятся в ЭВМ и используются при вычислениях эффективных радиоярких температур нагрузок для конкретных лучей. В ЭВМ осуществляется преобразование данных в столбцах изображения к шкале абсолютных температур, формирование полного выходного кадра и его визуализация на экране дисплея с периодичностью порядка 1 с.

Аналого-цифровое преобразование осуществляется с частотой, обеспечивающей получение выборок, соответствующих сдвигке лучей антенны ~0,5 пространственного элемента разрешения по вертикальной координате изображения. Такая же сдвигка по горизонтальной координате обеспечивается за счет частотного разделения лучей. Это позволяет при формировании изображений реализовать потенциальное пространственное разрешение, определяемое апертурой антенны, а также впоследствии эффективно применять математические процедуры обработки, направленные на повышение разрешающей способности (инверсная фильтрация и т. п.). С целью более точного измерения уровней излучения калибровочных нагрузок для каждой из них получают 4 независимых отсчета в каждом полуцикле сканирования с последующим усреднением полученных значений при вычислении радиоярких температур.

С целью исследования возможностей метода в экспериментальном образце дополнительно установлены режимы накопления данных по 2, 4, 6, 8 последовательным кадрам при поэлементном усреднении данных в изображениях для снижения дисперсии шумов и повышения радиометрического разрешения. Для установления оптимального соотношения между уровнями аналоговых сигналов на выходах каналов радиометрического приемника и диапазоном преобразования АЦП в системе предусмотрена обратная связь "ЭВМ—приемник". Это обеспечивает автоматическую подстройку уровня усиления и начального смещения в каналах при изменении этих параметров

под действием дестабилизирующих факторов (напряжение питания, окружающая температура).

Внешний вид радиометрической системы "Зір" показан на 3-й стр. обложки. Там же приведен пример первичного радиотеплового изображения человека, у которого под одеждой размещена металлическая пластина, имитирующая наличие инородного предмета. Основные параметры системы приведены в **таблице**.

СВЧ-радиометрическая система формирования изображений «Зір» 3-мм-диапазона волн находится на завершающем этапе экспериментального проектирования. Созданный образец радиометрической системы прошел полный цикл функциональных испытаний, показавших высокие потенциальные возможности выбранного метода формирования изображений, а также правильность выбора основных технических характеристик. При этом реализованные значения некоторых параметров оказались недостаточно высокими с точки зрения перехода к опытному образцу эксплуатационной системы. В первую очередь это относится к полученным значениям шумовой температуры приемника и коэффициента рассеяния антенны. Ожидается существенное улучшение этих показателей в ходе проводимых работ по модернизации созданного образца.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Shilo S. A., Bykov V. M., Levda A. S., Komyak V. A. Microwave emission of human body as data source for contraband detection systems // Proceedings of the international symposium «Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves (MSMW'01)».— Kharkov, June 4—9.— 2001.— Vol. 2.— P. 846—848.
- Пат. 5760397 США, G01S 013/89. Millimeter wave imaging system / G. R. Huguenin, E. Moore, R. Kolodzinski, J. E. Kapitzky.— Оpubл. 02.06.98.
- Shilo S. A., Komyak V. A. Millimeter band scanning multi-beam radiometer // Proceedings of the international symposium «Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves (MSMW'98)».— Kharkov, September 15—17.— 1998.— Vol. 2.— P. 529—531.
- Евдокимов А. П., Крыжановский В. В. Новое направление в технике антенных решеток // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника.— 1996.— Т. 39, № 9—10.— С. 54—61.
- Hersman M. S., Poe G. A. Sensitivity of total power radiometer with periodical absolute calibration // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.— 1981.— Vol. 29, N 1.— P. 32—40.