

науч.-техн. конф. «Устройства и методы прикладной электродинамики». М., 1988. С. 143. [8] Иогансен Л. В. // Письма в ЖТФ. 1986. 12, № 5. С. 308. [9] Кириченко А. Я., Цвык А. И. // Изв. вузов, Радиофизика. 1986. 29, № 1. С. 128. [10] Кириченко А. Я., Солодовник В. А., Харьковский С. Н. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1987. 30, № 7. С. 74. [11] Кириченко А. Я., Солодовник В. А., Харьковский С. Н. // ЖТФ. 1988. 58, № 11. С. 2264. [12] Кириченко А. Я., Харьковский С. Н. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1990. 33, № 10. С. 81. [13] Харьковский С. Н. // Письма в ЖТФ. 1990. 16, № 11. С. 90.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 3

УДК 621.381

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Р. А. Амирян *)

Рассмотрено использование устройств миллиметрового диапазона на транспорте, в связи и в устройствах для радиометрического зондирования поверхности суши и океана. Обобщены основные технические характеристики разработанных устройств.

1. Введение

В настоящее время возможные области применения техники миллиметрового диапазона (30—300 ГГц) в народном хозяйстве очень обширны, полностью охватить их практически невозможно, поэтому в этом кратком обзоре затронуты лишь наиболее типичные применения устройств, которые, возможно, будут выпускаться серийно.

Одно из ранних применений техники миллиметрового диапазона было в радиоастрономии, но оно не рассматривается в данном обзоре. Также не будет рассматриваться использование устройств КВЧ-диапазона в медицине и биологии.

Мощный стимул к промышленному и гражданскому применению техники миллиметрового диапазона появился после того, как достижения полупроводниковой технологии привели к созданию лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, диодов с барьером Шоттки, варакторных и *pin*-диодов, способных работать во всем диапазоне КВЧ. При этом твердотельные генераторы с низковольтным питанием и малыми габаритами позволили резко улучшить потребление энергии и эксплуатационные свойства устройств в целом, именно их появление дало толчок к интенсивному использованию миллиметровых волн. Удешевлению устройств способствует освоение гибридно-интегральной и монокристаллической технологий, разработка высокочастотных транзисторов.

Общие достоинства миллиметрового диапазона:

- большее по сравнению с длинноволновым диапазоном СВЧ угловое разрешение при тех же апертурах антенн;
- существование в спектре характерных зон, связанных с особенностями затухания в атмосфере;
- максимальное собственное радиотепловое излучение ненагретых тел в этом диапазоне;
- наличие наибольших радиотепловых контрастов у металлических объектов;

*)НПО «Исток», г. Фрязино Московской области.

— возможность работы устройств в неблагоприятных погодных условиях, что существенно облегчает их использование по сравнению с ИК-диапазоном.

2. Применение на транспорте

Уже более 15 лет делаются попытки использовать РЛС миллиметрового диапазона для создания систем предотвращения столкновений автомобилей, но пока ни одна фирма в мире не комплектует серийные автомобили такой системой в первую очередь из-за цены, так как допустимая стоимость систем была определена в пределах 1000 долл. [1]. Основная цель создания системы — своевременно информировать водителя о наличии препятствия на пути следования по трассе и оценить по скорости сближения и дальности до препятствия опасность столкновения [2], в крайнем случае — определить момент неизбежного столкновения и включить систему пассивной безопасности.

В табл. 1 приведены сведения о некоторых известных разработках автомобильных РЛС.

Таблица 1

Фирма	Год	Частота, ГГц	Тип РЛС	Дальность, м
Toyota Motor. Co.	1974	49,5	ЧМ	60
Nissan Motor. Co.	1978	24	Импульсная, ЧМ	60
	1985	60		
SEL AG	1974	35	ЧМ	100
AEG AG	1973	35	Импульсная	100
SMA/FIAT	1987	35		
Penn. State Univ.	1985	27		132
Vehicle Radar Safety Syst. Inc.				
Nissan Motor Co.	1983		Импульсная	
Battelle Memorial Inst.	1987	35—95	ЧМ	100
НПО «Исток»	1991	92—95	ФМ, ЧМ	120

Видно, что большинство разработчиков ограничиваются двумя типами РЛС — импульсной и с частотной модуляцией непрерывного излучения, а дальность действия ограничивается 100—130 м. При этом важными проблемами являются взаимные помехи этих РЛС и экологические требования снижения излучаемой мощности. Общей проблемой является уменьшение влияния отраженного сигнала от подстилающей поверхности — асфальта (рис. 1 [3]), так как при локации с движущегося автомобиля требуется точное знание его собственной скорости в реальном масштабе времени. Типичная эффективная отражающая поверхность автомобиля — 20 м².

В автомобильных РЛС конкурируют ЧМ и импульсные режимы работы. Достоинство импульсных систем — хорошая пространственная селекция, но при этом из-за малых расстояний до цели требуются очень короткие импульсы — порядка единиц и десятков наносекунд, что не просто осуществить практически. А ЧМ-системы для обеспечения хорошего разрешения требуют большой полосы девиации частоты и вы-

сокой линейности ЧМ-сигнала или использования специальных схем линеаризации.

В НПО «Исток» разрабатываются РЛС 3-мм диапазона с частотной и фазово-кодовой модуляцией сигнала. Они содержат двухантенную систему с синхронным механическим сканированием луча (диаграмма направленности — 1×4 градусов, частота сканирования — 5 Гц) и гибким волноводным соединением оригинальной конструкции, гибридно-интегральные балансные смесители, генераторы на диоде Ган-

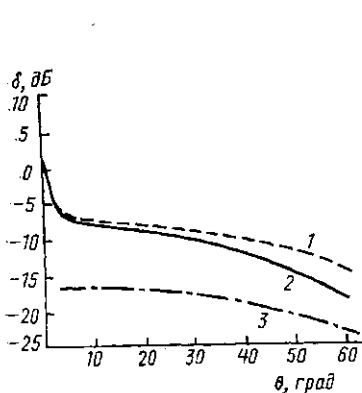


Рис. 1. Зависимость коэффициента относительного обратного отражения асфальта от угла наблюдения (относительно вертикали) на частоте 35 ГГц при горизонтальной (1), вертикальной (2) и кросс-поляризации (3) сигналов

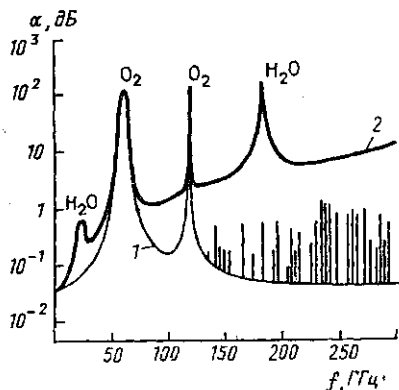


Рис. 2. Затухание в атмосфере («в зените») при отсутствии (1) и при наличии в воздухе паров воды (2 г/см^3) (2)

на, фазовые 0—180-градусные манипуляторы и схему обработки сигнала. Излучаемая мощность — 1—10 мВт. Предусмотрена максимальная совместимость устройств друг с другом. В ближайшее время планируется проведение сравнительных натуральных испытаний этих устройств.

Кроме устройств предотвращения столкновений автомобилей миллиметровый диапазон используют в системах контроля транспортных потоков [4], предназначенных для предотвращения транспортных заторов, и в измерителях скорости железнодорожных вагонов [5].

3. Зондирование атмосферы и поверхности Земли

Данные радиотеплового или активного зондирования атмосферы и поверхности суши и океана могут быть весьма информативными для геологии, картографии, океанологии, метеорологии и др. Имеется большое количество публикаций о применении радиометров миллиметрового диапазона для этих целей [6—19]. Выбор рабочих частот применяемых устройств чаще всего определяется тем, что атмосфера имеет несколько ярко выраженных частотных полос поглощения и пропускания (рис. 2 [19]) в миллиметровом диапазоне. По результатам зондирования в полосах поглощения можно судить о многих параметрах атмосферы, а полосы пропускания создают наилучшие условия зондирования поверхности Земли без помех.

Поскольку спектры поглощения различных газов хорошо известны, то по данным соответствующих измерений можно оценивать их содержание в атмосфере в целях экологического контроля.

Вообще цели зондирования Земли и атмосферы очень широки: от предсказания погоды и картографирования местности до определения степени созревания сельскохозяйственных культур, оценки состояния снежных покровов и таяния льдов.

Высокочувствительные малогабаритные радиометры миллиметрового диапазона могут легко устанавливаться на подвижных платформах. В ряде случаев чувствительность радиометров миллиметрового диапазона сейчас превышает чувствительность радиометров сантиметрового диапазона из-за более широких мгновенных полос пропускания всего тракта.

Типичные схемы радиометров, устанавливаемых на летательных аппаратах, содержат сканирующие антенны, устройства калибровки и термостатирования. На рис. 3 приведена характерная блок-схема четырехканального сканирующего радиометра [15].

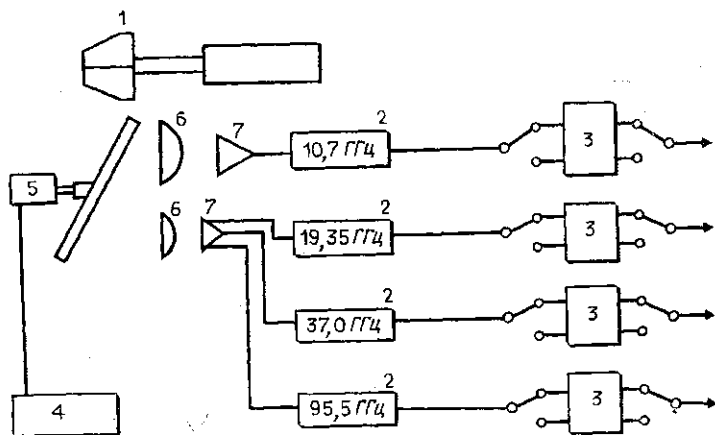


Рис. 3. Блок-схема четырехканального радиометра, работающего одновременно в диапазонах 10,7; 19,35; 37,0 и 85,5 ГГц: 1 — охлаждаемая и нагреваемая калибровочные нагрузки, 2 — приемо-преобразовательное устройство, 3 — переключенные «измерение—калибровка», 4 — управление сканером, 5 — мотор сканера, 6 — линза, 7 — рупор

Характеристики устройств миллиметрового диапазона, применяемые при зондировании атмосферы и поверхности Земли, сведены в табл. 2.

4. Применение в связи

Линии связи в миллиметровом диапазоне характеризуются небольшими расстояниями (до 10—15 км), но благодаря малым габаритам, пространственной локализации, широким полосам частот и сравнительно свободным от пользователей частотным диапазонам они сейчас на пороге интенсивного внедрения. По мере удешевления элементов тракта миллиметрового диапазона и интегральных схем связные устройства диапазона КВЧ наряду с кабельными линиями могут найти широкое применение в локальных и сотовых системах связи.

В обзоре [20] рассмотрены ранние разработки зарубежных радиорелейных систем диапазона 31—60 ГГц, а в табл. 3 — параметры более поздних систем связи в миллиметровом диапазоне.

Таблица 2

Страна, фирма	Тип устройства	Решаемая задача	Частотный диапазон	Основные параметры	Источник
США, Georgia Inst. of Technol.	Двухчастотный самолетный радиометр	Радиовидение объектов на Земле	140 220	$K_{ш} = 9,8$ дБ $\Delta T = 0,058$ К $K_{ш} = 12-14$ дБ $\Delta T = 0,15-0,16$ К	[6]
»	»	»	92 183	$K_{ш} = 7$ дБ, $\Delta T = 0,21$ К $K_{ш} = 13,6-15,6$ дБ $\Delta T = 1,44-1,62$ К $\tau = 100$ нс	[7] [8]
США, Jet Prop. Lab.	Двухполяризационный вертолетный радиометр	Всепогодное картографирование	98	$\Delta T = 0,08$ К Разрешение 7 м Относительная точность 1 К	[9] [10] [11]
Российская Федерация НИРФИ	4-канальный бортовой радиометр	Дистанционное зондирование атмосферы	53,5— 55	$\Delta T = 0,6$ К	[12]
Англия, Philips Res. Lab.	Двухканальный радиометр	Метеорологические наблюдения	35 89	$K_{ш} = 8$ дБ, $\Delta T = 0,087$ К $K_{ш} = 8,4$ дБ $\Delta T = 0,09$ К	[13]
США, Hercules DESI	Активно-пассивное устройство зондирования	Картографирование	35	$\Delta T = 2$ К, $K_{ш}(SSB) = 8,5$ дБ ЛЧМ	[14]
США, Georgia Inst. of Technol.	4-канальный 2-поляризационный самолетный радиометр	Метеорологические наблюдения за облаками	10 19 37 85	$\Delta T = 0,31$ К $\Delta T = 0,33$ К $\Delta T = 0,22$ К $\Delta T = 0,38$ К	[15]
Франция, Depart. Radioast. Paris.	4-канальный стационарный радиометр	Метеорологические наблюдения	100 118 150 183		[16]
Ирландия, Nat. Microelectron. Research Centre	10-канальный спутниковый радиометр	Метеорологические наблюдения	108— 191,3	$\Delta T = 0,25-0,4$ К	[17]
Российская Федерация ОКБ МЭИ	2-частотный спутниковый радиометр	Радиовидение поверхности Земли	10 35	$\Delta T = 0,5$ К $\Delta T = 0,2$ К	

На рис. 4 показана одна из наиболее универсальных схем 8-мм приемопередатчика фирмы British Telecom. Res. Lab. Она использует как фазовую манипуляцию выходного сигнала, так и частотную модуляцию. Основные элементы тракта миллиметрового диапазона выполнены

Фирма	Рабочая частота ГГц	Выходная мощность мВт	Тип модуляции	Скорость передачи, Кбит/с	Максимальная дальность связи, км
CNET	31	50	ЧМ	528/704	10
AEG	40	100	ЧМ	1,2/64	3,5
Siemens	36	100	ЧМ	4,3	0,2—8
Alc. Th.	40	50	ЧМ	15 000	15
M/A-Com	40	50	ЧМ	5 000	
NEC	50	15	ЧМ	1,5/8,5	
Fujitsu	50	10	ЧМ	1,2/9,6	2—5
Matsushita	50	10	ЧМ	4 000	15
British Telec. Res. Lab.	29	60—120	ФМ/ЧМ	8 000	10
НПО «Исток»	92—96	10	ЧМ, ФМ	10 000	3—5

в гибридно-интегральном исполнении, упрощающем их изготовление и компоновку.

В настоящее время в НПО «Исток» разработаны два варианта 3-мм дуплексного устройства связи. Каждое из них содержит по две антенны Кассегрена с диаграммой направленности порядка 2 градусов,

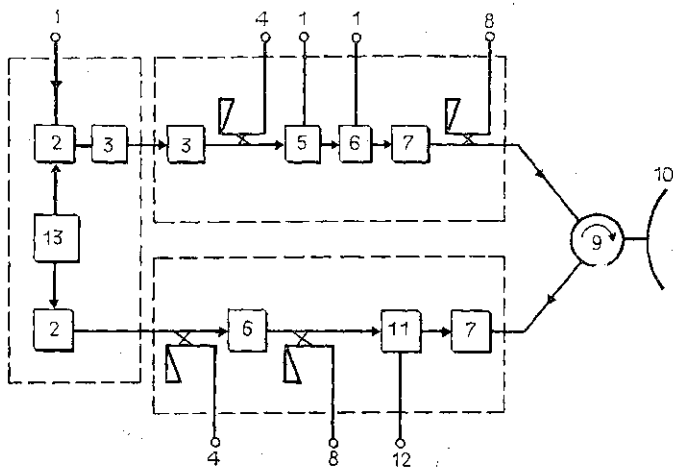


Рис. 4. Блок-схема приемопередатчика диапазона 29 ГГц: 1 — сигнал управления, 2 — генератор на диоде Ганна, 3 — вентиль, 4 — к схеме автоматической подстройки частоты, 5 — фазовый манипулятор, 6 — управляемый аттенуатор, 7 — волноводный фильтр, 8 — к схеме контроля, 9 — циркулятор, 10 — антенна, 11 — смеситель с предварительным усилителем ПЧ, 12 — выход ПЧ, 13 — источник питания

генераторы на диоде Ганна с мощностью 10—15 мВт, балансные смесители с двухполосным коэффициентом шума не более 6 дБ, а также фазовый манипулятор на *pin*-диолах или генератор с варакторной перестройкой частоты. Вариант с фазовой манипуляцией выходного сигнала имеет схему кварцевой стабилизации частоты (до 10^{-6}), использующую гармонический смеситель, а вариант с частотной модуляцией — систему термостабилизации частоты передающего генератора,

обеспечивающую стабильность частоты до 10^{-4} . Устройства предназначены для передачи цифровой информации со скоростью до 10 Мбит/с, что обеспечивает достаточно большой круг возможных применений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brus E. // *Microwaves*. 1987. 26, N 9. P. 53. [2] Yung-Kuang Wu, Tresselt C. P. // *Microwave Journal*. 1977. 20, N 11. P. 39. [3] Ulabi F. T., Haddock T. F., East J. R., Whit M. W. // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 1988. 26, N 1. P. 75. [4] Meinel H. H. // *Alta Frequenza*. 1989. 58, N 5—6. P. 441. [5] Негирев А. А. // *Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ*. 1985. 10. С. 62. [6] Forsythe R. E. // *Proc. 8 Int. Conf. IR and Millimeter Wave*. Miami Beach, Florida, USA, 1983. P. M. 6.9. [7] Gagliano J. A., McSheehy J. J., Cavalieri D. J. // *Proc. SPIE, Millimeter Wave Techn.* 1983. 423, Pt. II. P. 164. [8] Gagliano J. A., Platt R. H. // *Proc. 10 Int. Conf. IR and Millimeter Wave*. Orlando, Florida USA, 1985. P. 92. [9] Wilson W. J., Howard R. J., Parks G. S. // *Digest Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Massachusetts, USA. 1985. V. 2. P. 647. [10] Wilson W. J., Howard R. J., Parks G. S. // *Proc. 10 Int. Conf. IR and Millimeter Wave*, Orlando, Florida, USA, 1985. P. 191. [11] Wilson W. J., Howard R. J., Ibbott A. C. et al. // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 1986. **MTT-34**. P. 1026. [12] Рассадковский В. А., Троицкий А. В., Волохов С. А., Синенко А. С. // *Радиотехника*. 1985. № 4. С. 62. [13] Sayers A. D. // *IEE Proc.* 1986. **H133**, N 3. P. 233. [14] Roeder R. S., Teti J. J. // *Proc. SPIE, Millimeter Wave Techn. IV*. 1987. 791. P. 114. [15] Galliano J. A., Platt R. H. // *Proc. SPIE, Millimeter Wave and Synthetic Aperture Radar*. 1989. 1101. P. 204. [16] Priegent C., Beaudin A. G., Cheudin M., Ruffie G. // *Rev. Phys. Appl.* 1988. 23. P. 1281. [17] Lyons B. N., Sheridan I., Shehy F. // *Microwave Journal*. 1990. 33, N 6. P. 197. [18] Jacobson M. D., Hogg D. C., Shider J. B. // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 1986. **GE-24**, N 5. P. 784. [19] Pick D. R. // *Proc. 16 Eur. Microwave Conf.*, Dublin, Ireland, 1986. P. 31. [20] Белкин М. Е., Визель А. А. // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1983. № 11. С. 80.