

УДК 621.396.67

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА, ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В. Н. Красюк,

д-р техн. наук, профессор

О. Ю. Платонов,

ассистент

А. Ю. Мельникова,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Освоение ММД длин волн обусловлено очевидными преимуществами ММД при использовании его в РТС ближней локации. Несомненный интерес вызывают исследования, связанные с изучением особенностей распространения радиоволн ММД в атмосфере, особенно в сложных метеорологических условиях, в условиях тумана и задымленности. В статье приводятся результаты сравнительного анализа основных параметров РЛС, работающих в длинноволновой и коротковолновой частях ММД длин волн (8 и 3 мм). Выделены несколько перспективных направлений развития РТС, использующих ММД длин волн.

Evident advantages of millimeter wavelength range, using in the radio-technical systems of near location, had been condition of millimeter range wide mastering. Investigations associating with research of features of the millimeter radio-waves propagation in atmosphere, especially in complete meteorological conditions, such as a fog and a smoke, excite certain interest. The comparative analysis results of basic characteristics of the radar, operating in the different parts of the millimeter wavelength range (8 mm and 3 mm), has been suggested in this article. Therefore, may be selected some perspective directions of radio-technical systems, using of millimeter wavelength range, development.

Активное освоение миллиметрового диапазона (ММД) длин волн, наметившееся в последние годы, обусловлено целым рядом факторов, выгодно отличающих эту область радиоволн от сантиметрового и дециметрового диапазонов.

В ММД существенно выше разрешающая способность РЛС по угловым координатам, при этом габариты антенных систем (АС) могут быть значительно уменьшены. Использование радиоволн ММД позволяет, в силу существенной зависимости их коэффициентов отражения и поглощения от природы и структуры отражающей поверхности, определять свойства этой поверхности, включая ее фазовые состояния (вода, лед, снег) и рельеф (степень волнения, тернистости и др.). Таким образом, в ММД длин волн становится возможным неконтактное измерение характеристик отражающих поверхностей. В ММД длин волн мал уровень атмосфер-

ных и промышленных помех. РТС ММД менее восприимчивы к преднамеренным помехам со стороны противника, так как возможность работы в широкой полосе частот позволяет путем использования широкополосной ЧМ и кодирования сигналов повысить помехозащищенность и скорость обработки принимаемой информации. ММД не перегружен, работающие в нем средства связи имеют хорошую электромагнитную совместимость со средствами связи других диапазонов. Радиоволны ММД со сравнительно небольшим затуханием проходят через плазму. На миллиметровых волнах (ММВ) обеспечивается большой доплеровский сдвиг частоты, что существенно облегчает распознавание и классификацию движущихся и маневрирующих целей.

По сравнению с оптическим диапазоном радиоволны ММД также отличаются рядом преимуществ.

Практически не уступая в своей коротковолновой части по разрешающей способности инфракрасному (ИК) излучению, ММВ обеспечивают большую дальность обнаружения. РТС ММД нормально функционируют в условиях тумана, сильной запыленности, густой облачности (например, в тумане с видимостью до 100 м затухание в ИК- и оптическом диапазонах возрастает до 100 дБ/км и более, в то же время затухание ММВ в этих условиях не превышает нескольких дБ/км) [1]. РТС, работающие в ММД, обладают точностью, близкой к точности электронно-оптических средств и в то же время обеспечивают всепогодность и круглосуточность применения, что характерно для РТС, работающих в диапазоне СВЧ. На условия распространения волн ММД не влияет смена суток и сезонов года.

Несмотря на отсутствие резкой границы в закономерностях распространения между сантиметровыми волнами (СМВ) и волнами ММД, некоторые явления, связанные не только с распространением, но и с излучением и поглощением радиоволн в ММД, качественно отличаются от аналогичных явлений, наблюдаемых на более длинных волнах. Это обстоятельство требует нового подхода к анализу работы РТС в ММД радиоволн.

Для ММВ характерно интенсивное поглощение электромагнитной энергии в атмосфере, а также наличие резонансного поглощения кислородом на длинах волн 5,0, 2,5 и 1,7 мм [2]. Таким образом, в ММД атмосфера имеет ряд окон прозрачности и пиков поглощения, средние частоты и длины волн которых представлены в табл. 1 [3]. Там же представлены границы поддиапазонов, соответствующих окнам прозрачности и окнам поглощения, выделенные согласно решению Всемирной административной конференции по радиосвязи.

Радиосвязь, как правило, осуществляется в окнах прозрачности. Большее по сравнению с СМВ поглощение ММВ в гидрометеорах приводит к снижению дальности связи, что требует повышения энергетического потенциала радиолиний для компенсации затухания. В то же время, с точки зрения защищенности передаваемой информации от разведки противника, целесообразно использование окон поглощения. Так, в диапазоне частот в районе 60 ГГц наблюдается самое большое поглощение ММВ кислородом, составляющее 16–17 дБ/км при ясной погоде. Эта особенность по-

■ **Таблица 1.** Границы поддиапазонов, соответствующих окнам прозрачности и окнам поглощения волн ММД в атмосфере

Поддиапазон	Окно прозрачности		Участок поглощения	
	Средняя частота, ГГц	Средняя длина волны, мм	Средняя частота, ГГц	Средняя длина волны, мм
30–51,4	35	8,6	–	–
51,4–66	–	–	60	5
66–105	94	3,2	–	–
105–134	–	–	120	2,5
134–170	140	2,1	–	–
170–190	–	–	180	1,7
190–275	230	1,3	–	–

■ **Таблица 2.** Погонное затухание радиоволн ММД в атмосфере

Погонное поглощение радиоволн ММД в газах атмосферы γ_d , дБ/км							
Частота, ГГц	Поглощение в парах воды при плотности, г/м ³		Поглощение другими газами атмосферы	Суммарное поглощение при влажности, г/м ³			
	7,5	20,0		7,5	20,0		
10	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,015		
35	0,05	0,13	0,05	0,1	0,18		
94	0,2	0,52	0,045	0,25	0,57		
140	1,0	2,7	0,03	1,0	2,7		
Значения параметров K_d и α для расчета погонного затухания в дожде							
Частота, ГГц	K_d , дБ · ч/м ²			α			
	Поляризация						
	горизонтальная	вертикальная	горизонтальная	вертикальная			
10	0,0101	0,0089	1,28	1,26			
15	0,0367	0,0347	1,15	1,13			
30	0,187	0,167	1,02	1,00			
80	0,975	0,906	0,769	0,769			
90	1,06	0,999	0,753	0,754			
Значение коэффициента K_T при температуре 18 °С, дБ · м ³ /(г · км)							
Длина волны, см	0,2	0,5	0,7	1,0	1,25	2,0	3,0
K_T	7,14	1,65	0,876	0,438	0,280	0,112	0,050
Зависимость оптической видимости от влажности тумана							
Влажность M_T , г/м ³	2		1	0,5	0,2	0,1	
Оптическая видимость, м	30		50	80	200	300	
Классификация типов снега и погонное ослабление γ_d на частоте 35 ГГц, дБ/км							
Тип снега	Плотность снега (дождя), г/м ³	Содержание воды, г/м ³		γ_d			
Сухой	0,08	0,006		0,05			
Слегка влажный	0,09	0,008		0,5			
Влажный	0,1	0,01		1,3			
Мокрый	0,27	0,077		2,3			
Обводненный	0,5	0,25		3,5			
Дождь	1,0	1,0		1,1			

зволяет практически исключить возможность обнаружения и перехвата радиосигналов, если станция перехвата расположена лишь на несколько сотен метров дальше от передатчика, чем приемник. Повышенное затухание в пиках поглощения позволяет передавать информацию на соответствующих им частотах при низком уровне взаимных помех от различных служб и организовывать скрытую связь вдоль поверхности Земли на небольших расстояниях. Кроме того, частоты, соответствующие пикам поглощения в атмосфере, могут использоваться на межспутниковых линиях связи большой протяженности за пределами атмосферы. В этом случае атмосфера выполняет роль заграждающего фильтра по отношению к помехам Земли.

В табл. 2 представлены данные о поглощении радиоволн ММД водяным паром, содержащимся в атмосфере [1]. Плотность водяного пара 7,5 г/м³ считается стандартной для континентальных районов с умеренным климатом, плотность 20,0 г/м³ ха-

рактерна для нижних слоев тропосферы над океанами и морями субтропической, тропической и экваториальных зон, а также для прибрежных районов суши в этих широтах. Из табл. 2 видно, что поглощение ММВ в газах атмосферы, прежде всего в парах воды, требует заметного повышения потенциала РЛС, работающих в коротковолновой части ММД по сравнению с РЛС сантиметрового диапазона. Например, при дальности действия 5 км энергетический потенциал станции на частоте 140 ГГц в зависимости от условий работы должен на 10–27 дБ превосходить потенциал сантиметровых радиолокаторов.

Поглощение в газах атмосферы является прогнозируемым фактором, причем для расчета полного ослабления на трассе с достаточной точностью можно пользоваться климатическими данными. При этом необходимо оценивать наихудшие условия работы, т. е. ориентироваться на времена года с наибольшей влажностью атмосферы.

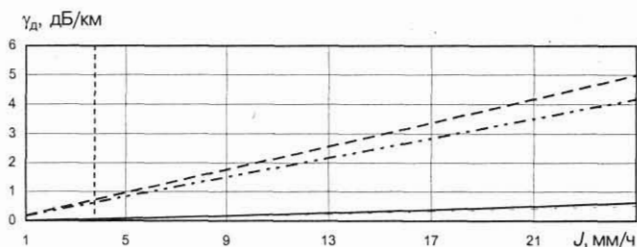
В отличие от поглощения в газах ослабление ММВ, вызываемое осадками, может прогнозироваться только в вероятностном смысле. В настоящее время разработаны методы расчета вероятностных характеристик ослабления радиосигналов на трассах различной протяженности, в том числе на трассах Земля–Космос. Погонное ослабление радиоволн в однородном дожде во всем частотном диапазоне рассчитывается по формуле:

$$\gamma_D = K_D J^\alpha, \quad (1)$$

где γ_D — погонное затухание, дБ/км; J — интенсивность осадков, мм/ч; K_D — параметр, зависящий от длины волны, температуры, поляризации, дБ · ч/м²; α — безразмерная величина, значение которой так же, как и K_D , зависит от длины волны, температуры, поляризации и приводится в табл. 2 [1].

На рис. 1 представлены результаты расчетов погонного затухания радиоволн ММД в осадках различной интенсивности, выполненных в соответствии с (1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: — зависимость погонного затухания от интенсивности дождя $\gamma_D(J)$ при горизонтальной поляризации радиосигнала на частоте 10 ГГц; - - - - аналогичная зависимость для частоты радиосигнала 30 ГГц; точечной (.....) линией представлена зависимость $\gamma_D(J)$ при вертикальной поляризации радиосигнала на частоте 10 ГГц; - · - · - · - анало-



■ Рис. 1. Погонное затухание радиоволн в зависимости от интенсивности дождя

гичная зависимость на частоте 30 ГГц. Вертикальными линиями обозначены расчетные интенсивности осадков 1 мм/ч (—) и 4 мм/ч (— · —), которые часто используют при практических оценках затухания радиоволн. Критерием такого выбора является условие, при котором реальное ослабление на трассе не превышает расчетного более 1 % времени в среднем в течение года. При этом интенсивность 1 мм/ч соответствует 99 % обеспеченности работоспособности радиолинии в климатических зонах со среднегодовым количеством осадков 300–500 мм, характерным для большей части Центральной Европы. Интенсивность, равная 4 мм/ч, соответствует такой же обеспеченности для районов со среднегодовым количеством осадков 2000–3000 мм (Юго-Восточная Азия, экваториальные зоны Африки и Латинской Америки, некоторые прибрежные районы субтропиков).

В настоящее время значительное внимание в исследованиях по влиянию осадков на работу радиолиний уделяется вопросам учета неоднородности дождя на трассе распространения, что особенно важно при расчете радиорелейных линий и линий Земля–Космос. Кроме того, при анализе работы радиолокационных систем ММД обычно можно ограничиваться предположением об однородности дождя в пределах дальности действия РЛС. Основанием для этого служит следующее. Как видно из рис. 1, даже при слабых дождях создаваемое ими ослабление достаточно велико. Оценки показывают, что при современном энергетическом потенциале РЛС ММД их дальность действия в таких осадках не превышает 5–10 км. В сильных дождях с интенсивностью более 10 мм/ч во всем ММД погонное ослабление превосходит 5–7 дБ/км, и в этом случае дальность действия РЛС не превышает 1–3 км. Следовательно, предполагая дождь однородным в пределах всей дальности действия РЛС, незначительно завышается суммарное ослабление сигнала.

Ослабление радиоволн ММД в тумане зависит от количества жидкой воды в единице его объема, т.е. водности этого гидрометеорологического образования, а также от его температуры. Величина погонного ослабления в этом случае определяется по формуле

$$\gamma_D = K_T M_T,$$

где M_T — водность, г/м³; K_T — удельный погонный коэффициент ослабления, дБ · м³/(г · км), значения которого при температуре 18 °С представлены в табл. 2.

Следует отметить, что коэффициент K_T имеет сильную температурную зависимость: на длине волны 5 см он изменяется примерно в три раза в интервале температур от 0 до 40 °С, убывая с увеличением температуры. Водность тумана ориентировочно можно определить по оптической видимости в нем, пользуясь данными, также приведенными в табл. 2. Вероятность появления туманов в равнинной местности в холодное время года составляет 3–5 %, а в теплые месяцы — 0,6–2,0 %, причем

приземные туманы могут захватывать большие районы протяженностью 100–1000 км. Высока вероятность возникновения туманов над океанами и морями в высоких широтах, где она может достигать 40 %.

Многообразие форм выпадающего снега и сильная зависимость поглощения радиоволн ММД от влажности снега затрудняют разработку теоретических моделей или подбор эмпирических зависимостей. Классификация типов выпадающего снега и погонное ослабление им радиоволн на частоте 35 ГГц представлены в табл. 2 [1]. Из данных таблицы видно, что в сухом снегу ослабление составляет менее 0,05 дБ/км, т. е. сравнимо с поглощением радиоволн ММД в газах атмосферы, в то время как во влажном снегу ослабление составляет 2,3–3,5 дБ/км, что превосходит затухание радиоволн в дожде той же интенсивности.

Радиоволны ММД с небольшим затуханием проходят через плазму, поэтому используются для связи с ракетами, проходящими через ионизированную атмосферу. В [4] приведены результаты расчета потерь энергии электромагнитных волн за счет поглощения и однократного отражения от границы плазма — воздух. Расчеты приведены для случая нормального прохождения через слой плазмы толщиной 10 см с параметрами: концентрацией электронов $N_e = 2,8 \cdot 10^{12}$ 1/см³ и частотой соударений $5,0 \cdot 10^9$ 1/с для следующих длин волн: 20 м, 4,0 м, 0,5 м, 0,05 м и 0,008 м. Результаты расчетов приведены в табл. 3. В указанной таблице приняты следующие обозначения: λ — длина волны, м; f — частота радиосигнала, МГц; α — погонное затухание радиоволн в плазме, дБ/м; $L_{\text{погл.}}$ — коэффициент поглощения радиоволн в плазме, дБ; $L_{\text{отр.}}$ — коэффициент отражения в плазме, дБ; L — коэффициент суммарных потерь дБ.

Из табл. 3 видно, что потери радиоволн при прохождении через плазму зависят от частоты сигнала. При заданных параметрах плазмы потери, практически исключающие прохождение радиоволн, наблюдаются в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн. В то же время в ММД суммарные потери сравнительно невелики. Наибольшие потери на всех указанных длинах волн вносит поглощение; сравнительно небольшие потери имеют место за счет отражения радиоволн плазмой.

Перечисленные особенности распространения радиоволн ММД позволяют сделать вывод о перспективах их использования в РТС самого разного назначения. В связи с этим можно выделить не-

сколько основных направлений развития РТС ММД. Несомненны преимущества применения ММД в системах ближней локации с высокой разрешающей способностью (вплоть до радиовидения на волнах с длинами 2–3 мм). Эффективным представляется применение ММВ в системах обнаружения и обигания препятствий особенно в условиях плохой видимости (сильная задымленность, туман, облачность), при полетах ЛА на малой высоте с большой скоростью и т. п. Перспективной является возможность осуществления дистанционного мониторинга земной поверхности при наблюдении с ЛА с целью получения информации о влажности почвы, растительном покрове, масляных (нефтяных) пятнах на водной поверхности, состоянии снежного и ледового покрова и т.п. [5]. Нельзя не упомянуть о возможности применения радиоволн ММД в качестве эффективного не летального (ожогового) оружия.

При использовании радиоволн ММД в РТС, на первый взгляд, очевидным преимуществом обладает диапазон волн со средней длиной волны 8 мм (35 ГГц), обеспечивающий наименьшее затухание в атмосфере (см. табл.1). Однако, если исходить из одинаковых массогабаритных характеристик антенны, в диапазоне длин волн, близких к 3 мм, обеспечивается существенно больший коэффициент усиления антенны, большая эффективная величина рассеяния (ЭПР) отражающего объекта, в несколько раз большая разрешающая способность. Кроме того, в ММД вблизи длины волны 3 мм при одной и той же относительной полосе пропускания можно получить большую абсолютную полосу усиливаемых частот. Участок ММД со средней длиной волны 3 мм, уступая более длинноволновым участкам ММД по характеристикам, связанным с потерями в атмосфере (см. рис. 1, табл.2), по ряду других параметров, определяющих дальность, имеет важные преимущества по сравнению с участком ММД вблизи окна прозрачности, соответствующего 8 мм.

Проведем сравнительную количественную оценку некоторых основных радиолокационных параметров в ММД длин волн.

1. При одинаковом эффективном диаметре антенны D коэффициент усиления $G \sim (D/\lambda)^2$ при $\lambda \approx 3$ мм почти на порядок больше, чем на участке ММД, соответствующем 8 мм [5].

2. Для плоской отражающей поверхности при угле падения сторонней волны $\phi > \pi/4$ ЭПР $\sigma(\phi)$ пропорциональна $1/\lambda^2$. При скользющем угле падения и вертикальной поляризации падающей волны ЭПР пропорциональна $1/\lambda^4$. Это позволяет получить на длине волны 3 мм значение ЭПР на порядок больше по сравнению с ЭПР, полученной на длине волны 8 мм.

ЭПР прямоугольной пластины с размерами a, b можно определить из следующего выражения:

$$\sigma(\phi) = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left[\frac{\sin(ka \sin(\phi))}{ka \sin(\phi)} \right], \quad (2)$$

■ Таблица 3. Потери энергии электромагнитных волн за счет поглощения и однократного отражения от границы плазма–воздух

λ , м	f , МГц	α , дБ/м	$L_{\text{погл.}}$, дБ	$L_{\text{отр.}}$, дБ	L , дБ
20,0	15,0	$2,5 \cdot 10^2$	25,0	19	44,0
4,0	75,0	$4,2 \cdot 10^2$	42,0	14	56,0
0,5	600	$1,67 \cdot 10^3$	167,0	13	180,0
0,05	6000	$3,4 \cdot 10^3$	340,0	13	353,0
0,008	37 500	$1,7 \cdot 10^1$	1,7	0	1,7

где k — волновое число; ϕ — угол падения сторонней волны, отсчитываемый в азимутальной плоскости относительно нормали к поверхности пластины.

Результаты расчетов, выполненные в соответствии с (2) для длин волн 8 и 3 мм, представлены на рис. 2. Сплошной линией на рисунке обозначена диаграмма рассеяния (ДР) в азимутальной плоскости от прямоугольной отражающей пластины при падении сторонней волны с длиной 8 мм; штриховой линией — ДР в азимутальной плоскости такой же пластины при падении волны с длиной 3 мм.

3. Доплеровский сдвиг F_d частоты при скорости цели 30 км/ч (8,333 м/с) может быть рассчитан по формуле [6]

$$F_d = f_0 \left[\frac{1 - V_r/c}{1 + V_r/c} \right],$$

где V_r — радиальная скорость цели; f_0 — частота падающей волны; c — скорость света.

Результаты расчета доплеровского сдвига частоты представлены в табл. 4.

Факторы, перечисленные в пп. 1–3, компенсируют уменьшение дальности на участке ММД вблизи длины волны 3 мм, вызванное увеличением удельных потерь на 3–4 дБ при сложных метеорологических условиях.

4. Разрешающая способность по дальности ΔR обеспечивается в основном параметрами зондирующего импульса и, казалось бы, от несущей частоты радиосигнала не зависит. Однако при внутриимпульсной ЛЧМ она определяется следующим образом:

$$\Delta R = \frac{c}{2 \Delta F},$$

где c — скорость света; ΔF — абсолютная девиация ЛЧМ-сигнала.

Очевидно, что при $\lambda = 3$ мм большее значение ΔR достигается при меньшей относительной девиации частоты, чем при $\lambda = 8$ мм. Так, при $\Delta F_{\text{отн}} = 0,5\%$ на несущей частоте 94 ГГц ($\Delta F = 400$ МГц) реализуется $\Delta R = 37,5$ см, в то время как при таком же значении $\Delta F_{\text{отн}}$ на несущей частоте 35 ГГц может быть получено значение $\Delta R = 85,7$ см.

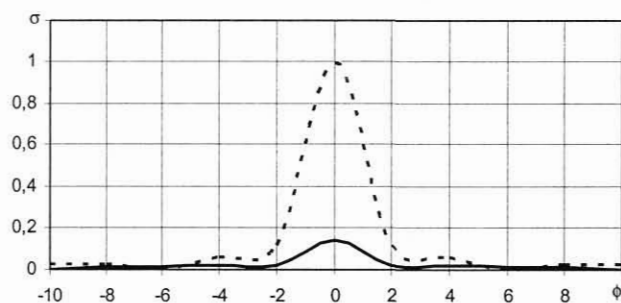


Рис. 2. Диаграмма рассеяния прямоугольной пластины, ориентированной ортогонально направлению падения волны

Таблица 4. Зависимость доплеровского сдвига частоты от длины падающей радиоволны

λ , м	0,03	0,008	0,003	0,002
F_d , Гц	$1 \cdot 10^{10}$	$3,75 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$

5. Разрешающая способность по азимуту определяется главным образом шириной диаграммы направленности антенны $\Delta\Phi$, которая, в свою очередь, зависит от отношения эффективного диаметра антенны D к длине волны λ . Преимущество трехмиллиметрового диапазона перед восьмимиллиметровым при одинаковом значении D в этом случае очевидно. При одинаковом значении $\Delta\Phi$ в трехмиллиметровом диапазоне достигается значительное (приблизительно в 3 раза) уменьшение D .

Основные параметры РЛС ММД, работающих на длинах волн 8 и 3 мм, приведены в табл. 5.

При проводимой сравнительной оценке следует принять во внимание параметры, характеризующие мощность излучения и шумы приемных устройств. В этих случаях, безусловно, участок ММД со средней длиной волны 8 мм имеет преимущество.

При переходе к окну прозрачности в атмосфере, соответствующему средней длине волны 2 мм, выигрыш в значениях G и σ составляет лишь 2,25 раза, тогда как увеличение потерь в сложных метеосостояниях составляет примерно 6–8 дБ, не считая значительного затухания в волноводном тракте. Следовательно, переход к еще более коротковолновому участку ММД не оправдан.

Рассмотрев особенности распространения волн ММД и сравнив РТС ММД с оптическими системами и РТС, работающими на СВЧ, можно сделать следующий вывод: эффективность использования РТС ММД и выбор рабочей частоты определяются

Таблица 5. Основные параметры РЛС ММД, работающих на длинах волн 8 и 3 мм [5]

Параметр	Длина волны, мм	
	8	3
Диаметр антенны, м, при одинаковом отношении D/λ	2,0	0,75
Диаметр антенны, м, при ширине ДН по уровню половинной мощности 0,5 град	1,9	0,5
Относительная ЭПР (при одинаковой геометрической площади отражения)	1,0	7,8
Поперечная разрешающая способность, мин	22 ($D/\lambda \sim 225$)	8 ($D/\lambda \sim 150$)
Разрешающая способность по дальности, м	0,86	0,38
Доплеровский сдвиг частоты, ГГц	37,5	100,0
Массогабаритные характеристики СВЧ-части, отн. ед.	1,0	0,25

не только конкретными задачами, но и условиями применения.

Как правило, функционирование РТС ММД осуществляется на длинах волн, соответствующих окнам прозрачности, т. е. 8,6 и 3,2 мм. При сильной запыленности местности, в пустынных районах Африки, Средней Азии и Ближнего Востока, более эффективным представляется использование длинноволновой области ММД, поскольку на более коротких волнах, тем более в ИК- и оптическом диапазонах, велико рассеяние электромагнитного излучения на частицах пыли, песка и т. п. По этим же причинам затруднено использование волн ИК и оптического диапазонов в условиях сильной задымленности местности, где предпочтительно применение ММД. Вследствие существенного поглощения волн ММД водяным паром, содержащимся в атмосфере, и осадками затруднено применение волн ММД над поверхностью океанов и морей а также над прибрежными районами субтропических, тропических и экваториальных зон Юго-Восточной Азии, Африки и Латинской Америки. В этих районах возможно использование длинноволновой области ММД, а также коротковолновой части диапазона СВЧ. В районах с сухим континентальным климатом либо в районах, характеризующихся умеренной интенсивностью осадков (Центральная Европа, Сибирь и т. п.), в системах ближней локации различного назначения предпочтительно использование РТС, работающих в коротковолновой области ММД. В этой же области ММД представляется эффективным функционирование средств обеспечения ледовой разведки при навигации судов в условиях Заполярья, Арктики и Антарктиды.

Для защиты передаваемой информации целесообразно использовать окна поглощения. Это позволяет передавать информацию при низком уровне взаимных помех и организовывать скрытую связь на небольших расстояниях. Кроме того, частоты, соответствующие пикам поглощения в атмосфере, могут использоваться на межспутниковых линиях связи большой протяженности. В этом случае атмосфера выполняет роль заграждающего фильтра по отношению к помехам Земли.

Работа выполнена в рамках гранта Т02-02.5-3650 Минобразования РФ (конкурс 2002 г.) по фундаментальным исследованиям в области технических наук.

Литература

1. **Кулемин Г. П., Разказовский В. Б.** Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. — Киев: Наук. думка, 1987. — 232 с.
2. **Белоцерковский Г. Б.** Антенны. — М.: Оборонгиз, 1962. — 491 с.
3. **Гассанов Л. Г., Липатов А. А., Марков В. В., Могильченко Н. А.** Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. — М.: Радио и Связь, 1988. — 288 с.: ил.
4. **Красюк В. Н., Михайлов В. Ф.** Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов: Учебное пособие. — СПб.: СПбГААП, 1994. — 216 с.
5. **Гельвич Э. А.** Преимущества использования 3-мм диапазона длин волн для обеспечения безопасности полетов и судовождения // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. — Вып. 1(467). — 1996. — с. 55-57.
6. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации: Учебник для вузов. — М.: Радио и Связь, 1983. — 535 с.