

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R RS.515-5**  
(08/2012)

## **Полосы частот и ширина полос частот, используемые для спутникового пассивного дистанционного зондирования**

**Серия RS**  
**Системы дистанционного зондирования**



## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

### Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
<b>RS</b>	<b>Системы дистанционного зондирования</b>
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

*Примечание.* – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2013 г.

© ITU 2013

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.515-5\*

**Полосы частот и ширина полос частот, используемые для спутникового пассивного дистанционного зондирования**

(1978-1990-1994-1997-2003-2012)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации представлена информация о полосах частот и ширине полос частот, используемых для спутникового пассивного дистанционного зондирования Земли и ее атмосферы, для микроволновых пассивных датчиков.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что данные об окружающей среде, касающиеся Земли, приобретают возрастающее значение;
- b) что пассивные микроволновые датчики используются спутниками исследования Земли и метеорологическими спутниками в определенных полосах частот, распределенных для такого использования в Регламенте радиосвязи (RR);
- c) что некоторые из этих полос частот распределены также другим службам радиосвязи;
- d) что для измерений и применений пассивного зондирования необходима защита от помех на определенных частотах;
- e) что для измерений известных спектральных линий особую важность имеют определенные полосы на конкретных частотах;
- f) что для других типов измерений пассивными датчиками используется определенное число полос частот, точные положения которых в спектре не имеют особой важности, пока центральные частоты более или менее равномерно распределены в спектре;
- g) что в связи с непрерывным развитием науки и техники в полосах от 275 ГГц до 3000 ГГц должны периодически рассматриваться требования к пассивному зондированию;
- h) что для использования в полосах от 275 ГГц до 3000 ГГц могут быть определены три основные категории пассивных датчиков:
  - 1) трехмерные вертикальные атмосферные зонды, требующие очень высокой надежности данных и средней разрешающей способности по нескольким каналам;
  - 2) радиометры со средствами формирования изображений, требующие высокой надежности данных, средней разрешающей способности, интегрирования по одиночным каналам с относительно большой шириной полосы; и
  - 3) атмосферные лимбовые зонды, требующие средней надежности данных при очень высокой разрешающей способности по многим каналам с небольшой шириной полосы;
- j) что любые требования к рабочим характеристикам должны основываться на общепризнанных научных требованиях к измерению; в связи с этим разрешающая способность данных и уровни готовности должны быть научно значимыми в том что касается применений, для которых они используются (например, прогнозирование, наблюдения поверхности и мониторинг климата),

---

\* В 2010 году 7-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла редакционные поправки в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

*отмечая,*

- а) что в связи с большим числом спектральных линий, представляющих интерес для наблюдений Земли в области 1000–3000 ГГц, было бы практически невозможно определить отдельные полосы, пригодные для пассивного дистанционного зондирования в этом диапазоне;
- б) что атмосфера в диапазоне 1000–3000 ГГц настолько непрозрачна для любого излучения, что практически осуществимыми являются только наблюдения из верхней части атмосферы с использованием лимбового зондирования;
- с) что в связи с непрозрачностью атмосферы в диапазоне 1000–3000 ГГц надлежащая защита операций пассивного дистанционного зондирования в основном гарантирована, и совместное использование частот практически осуществимо с любой наземной службой радиосвязи,

*рекомендует,*

**1** чтобы, в соответствии с Приложениями 1 и 2, для спутникового пассивного дистанционного зондирования использовались полосы частот и связанная с ними ширина полос для пассивного зондирования свойств суши, океанов и атмосферы Земли в полосах ниже 275 ГГц, приведенных в таблице 1, и в полосах между 275 и 1000 ГГц, приведенных в таблице 2;

**2** что совместное использование частот в диапазоне частот 1000–3000 ГГц системами дистанционного микроволнового пассивного зондирования и системами любой наземной службы радиосвязи должно быть практически осуществимо.

ТАБЛИЦА 1

**Полосы частот для спутникового пассивного дистанционного зондирования на частотах ниже 275 ГГц**

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) или центральная частота (ГГц)	Измерение (метеорология-климатология, химия) (см. таблицу 3)	Типовой режим сканирования N, C, L <sup>(1)</sup>
1,37–1,427	57	1,4	Влажность почвы, соленость океана, температура поверхности моря, вегетационный индекс	N, C
2,64–2,7	60	2,67	Соленость океана, влажность почвы, вегетационный индекс	N
4,2–4,4	200	4,3	Температура поверхности моря	N, C
6,425–7,25	350 <sup>(4)</sup>	6,85	Температура поверхности моря	N, C
10,6–10,7	100	10,65	Интенсивность дождя, содержание воды в снеге, морфология льда, состояние моря, скорость океанского ветра	N, C
15,2–15,4	200	15,3	Водяной пар, интенсивность дождя	N, C
18,6–18,8	200	18,7	Интенсивность дождя, состояние моря, морской лед, водяной пар, скорость океанского ветра, коэффициент излучения и влажность почвы	N, C
21,2–21,4	200	21,3	Водяной пар, жидкая вода	N
22,21–22,5	290	22,235	Водяной пар, жидкая вода	N
23,6–24	400	23,8	Водяной пар, жидкая вода, соответствующие каналы атмосферного зондирования	N, C

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) или центральная частота (ГГц)	Измерение (метеорология-климатология, химия) (см. таблицу 3)	Типовой режим сканирования N, C, L <sup>(1)</sup>
31,3–31,8	500	31,4	Морской лед, водяной пар, разливы нефти, облака, жидкая вода, температура поверхности, эталонное окно для диапазона 50–60 ГГц	N, C
36–37	1 000	36,5	Интенсивность дождя, снег, морской лед, облака	N, C
50,2–50,4	200	50,3	Эталонное окно для создания профилей атмосферных температур (температура поверхности)	N, C
52,6–59,3	6 700 <sup>(2)</sup>	Несколько линий в интервале 52,6–59,3	Создание профилей атмосферных температур (линии поглощения O <sub>2</sub> )	N, C
86–92	6 000	89	Облака, разливы нефти, лед, снег, дождь, эталонное окно для температурного зондирования на частотах около 118 ГГц	N, C
100–102	2 000	100,49	N <sub>2</sub> O, NO	L
109,5–111,8	2 300	110,8	O <sub>3</sub>	L
114,25–116	1 750	115,27	CO	L
115,25–122,25	7 000 <sup>(2)</sup>	118,75	Создание профилей атмосферных температур (линия поглощения O <sub>2</sub> )	N, L
148,5–151,5	3 000	150,74	N <sub>2</sub> O, температура поверхности Земли, параметры облаков, эталонное окно для температурного зондирования	N, L
155,5–158,5 <sup>(3)</sup>	3 000	157	Параметры Земли и облаков	N, C
164–167	3 000 <sup>(2)</sup>	164,38; 167,2	N <sub>2</sub> O, облачные вода и лед, дождь, CO, ClO	N, C, L
174,8–191,8	17 000 <sup>(2)</sup>	175,86; 177,26; 183,31; 184,75	N <sub>2</sub> O, создание профилей водяного пара, O <sub>3</sub>	N, C, L
200–209	9 000 <sup>(2)</sup>	200,98; 203,4; 204,35; 206,13; 208,64	N <sub>2</sub> O, ClO, водяной пар, O <sub>3</sub>	L
226–231,5	5 500	226,09; 230,54; 231,28	Облака, влажность, N <sub>2</sub> O (226,09 ГГц), CO (230,54 ГГц), O <sub>3</sub> (231,28 ГГц), эталонное окно	N, L

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) или центральная частота (ГГц)	Измерение (метеорология-климатология, химия) (см. таблицу 3)	Типовой режим сканирования N, C, L <sup>(1)</sup>
235–238	3 000	235,71; 237,15	O <sub>3</sub>	L
250–252	2 000	251,21	N <sub>2</sub> O	L

- <sup>(1)</sup> N: Надирный режим. Надирный режим сканирования ориентирован на зондирование или наблюдение поверхности Земли при углах, соответствующих почти нормальному падению. Сканирование завершается на поверхности или на разных уровнях в атмосфере в соответствии с весовыми функциями. L: Лимбовый режим. В лимбовых режимах сканирования атмосфера наблюдается "на краю". Сканирование завершается в космосе, а не на поверхности, и, соответственно, весовая функция равна нулю на поверхности и максимальному значению на высоте точки касания. C: Конический режим. В конических режимах сканирования поверхность Земли наблюдается с помощью вращающейся антенны при углах отклонения от направления на надир.
- <sup>(2)</sup> Данная ширина полосы занята несколькими каналами.
- <sup>(3)</sup> Данная полоса необходима до 2018 года, чтобы обеспечить возможность работы существующих и планируемых датчиков.
- <sup>(4)</sup> Данная ширина полосы является требуемой шириной полосы датчика в диапазоне частот, приведенном в столбце 1.

ТАБЛИЦА 2

**Полосы частот для спутникового пассивного дистанционного зондирования на частотах между 275 и 1000 ГГц**

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) (ГГц) (см. таблицу 3)	Измерение			Типовой режим сканирования N, C, L <sup>(1)</sup>
			Метеорология-климатология	Окно (ГГц)	Химия	
275–285,4	10 400	276,33 (N <sub>2</sub> O), 278,6 (ClO)		276,4–285,4	N <sub>2</sub> O, ClO	L
296–306	10 000	Крыло для 325,1, 298,5, (HNO <sub>3</sub> ), 300,22 (HOCl), 301,44 (N <sub>2</sub> O), 303,57 (O <sub>3</sub> ), 304,5 (O <sup>17</sup> O), 305,2 (HNO <sub>3</sub> )	Крыльевой канал для температурного зондирования	296–306	OXYGEN, HNO <sub>3</sub> , HOCl, N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , O <sup>17</sup> O,	N, L

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) (ГГц) (см. таблицу 3)	Измерение			Типовой режим сканиро- вания N, C, L <sup>(1)</sup>
			Метеорология- климатология	Окно (ГГц)	Химия	
313,5–355,6	42 100	313,8 (HDO), {315,8, 346,9, 344,5, 352,9} (ClO), {318,8, 345,8, 344,5} (HNO <sub>3</sub> ), {321,15, 325,15} (H <sub>2</sub> O), {321, 345,5, 352,3, 352,6, 352,8} (O <sub>3</sub> ), {322,8, 343,4} (HOCl), {345,0, 345,4} (CH <sub>3</sub> Cl), 345,0 (O <sup>18</sup> O), 345,8 (CO), 346 (BrO), 349,4 (CH <sub>3</sub> CN), 351,67 (N <sub>2</sub> O), 354,5 (HCN)	Водяной пар, создание профилей облаков, крыльевой канал для температурного зондирования	339,5–348,5	HDO, ClO, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , HOCl, CH <sub>3</sub> Cl, O <sup>18</sup> O, CO, BrO, CH <sub>3</sub> CN, N <sub>2</sub> O, HCN	N, C, L
361,2–365	3 800	364,32 (O <sub>3</sub> )	Крыльевой канал для создания профилей водяного пара		O <sub>3</sub>	N, L
369,2–391,2	22 000	380,2 (H <sub>2</sub> O)	Создание профилей водяного пара		H <sub>2</sub> O	N, L
397,2–399,2	2 000		Создание профилей водяного пара			N, L
409–411	2 000		Температурное зондирование			L
416–433,46	17 460	424,7 (O <sub>2</sub> )	Кислород, создание профилей температуры		O <sub>2</sub>	N, L
439,1–466,3	27 200	442 (HNO <sub>3</sub> ), {443,1, 448} (H <sub>2</sub> O), 443,2 (O <sub>3</sub> ), 452,09 (N <sub>2</sub> O), 461,04 (CO)	Создание профилей водяного пара, облако	458,5–466,3	HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CO	N, L, C
477,75–496,75	19 000	487,25 (O <sub>2</sub> )	Кислород, создание профилей температуры		O <sub>2</sub>	L

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) (ГГц) (см. таблицу 3)	Измерение			Типовой режим сканиро- вания N, C, L <sup>(1)</sup>
			Метеорология- климатология	Окно (ГГц)	Химия	
497–502	5 000	{497,6, 497,9} (BrO), 497,9 (N <sub>2</sub> <sup>18</sup> O), 498,6 (O <sub>3</sub> )	Крыльевой канал для создания профилей водяного пара	498–502	BrO, N <sub>2</sub> <sup>18</sup> O, O <sub>3</sub>	L, N
523–527	4 000	Окно для 556,9	Крыльевой канал для создания профилей водяного пара	523–527		N
538–581	43 000	{541,26, 542,35, 550,90, 556,98} (HNO <sub>3</sub> ), {544,99, 566,29, 571,0} (O <sub>3</sub> ), 556,93 (H <sub>2</sub> O), 575,4 (ClO)	Создание профилей водяного пара	538–542	HNO <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, ClO	N, L
611,7–629,7	18 000	620,7 (H <sub>2</sub> O), 624,27 (ClO <sub>2</sub> ), {624,34, 624,89, 625,84, 626,17} (SO <sub>2</sub> ), {624,48, 624,78} (HNO <sub>3</sub> ), 624,77 ( <sup>81</sup> BrO), 624,8 (CH <sub>3</sub> CN), 624,98 (H <sup>37</sup> Cl), 625,04 (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ), {625,07, 628,46} (HOCl), 625,37 (O <sub>3</sub> ), 625,66 (HO <sub>2</sub> ), 625,92 (H <sup>35</sup> Cl), 627,18 (CH <sub>3</sub> Cl), 627,77 (O <sup>18</sup> O)	Создание профилей водяного пара, кислород		OXYGEN, H <sub>2</sub> O, ClO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , BrO, CH <sub>3</sub> CN, (H <sup>37</sup> Cl), H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , HOCl, O <sub>3</sub> , HO <sub>2</sub> , H <sup>35</sup> Cl, CH <sub>3</sub> Cl, O <sup>18</sup> O	L
634–654	20 000	635,87 (HOCl), 647,1 (H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O), 649,24 (SO <sub>2</sub> ), 649,45 (ClO), 649,7 (HO <sub>2</sub> ), 650,18 ( <sup>81</sup> BrO), 650,28 (HNO <sub>3</sub> ), 650,73 (O <sub>3</sub> ), 651,77 (NO), 652,83 (N <sub>2</sub> O)	Крыльевой канал для создания профилей водяного пара	634,8–651	HOCl, H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O, SO <sub>2</sub> , ClO, HO <sub>2</sub> , BrO, HNO <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> , NO, N <sub>2</sub> O	L, N

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

Полоса(ы) частот (ГГц)	Общая требуемая ширина полосы (МГц)	Спектральная(ые) линия(и) (ГГц) (см. таблицу 3)	Измерение			Типовой режим сканиро- вания N, C, L <sup>(1)</sup>
			Метеорология– климатология	Окно (ГГц)	Химия	
656,9–692	35 100	658 (H <sub>2</sub> O), 660,49 (NO <sub>2</sub> ), 687,7 (ClO), 688,5 (CH <sub>3</sub> Cl), 691,47 (CO)	Создание профилей водяного пара, облака	676,5–689,5	H <sub>2</sub> O, HO <sub>2</sub> , ClO, CH <sub>3</sub> Cl, CO	L, N, C
713,4–717,4	4 000	715,4 (O <sub>2</sub> )	Кислород		O <sub>2</sub>	L
729–733	4 000	731 (HNO <sub>3</sub> ), 731,18 (O <sup>18</sup> O)	Кислород		HNO <sub>3</sub> , O <sup>18</sup> O	L
750–754	4 000	752 (H <sub>2</sub> O)	Вода		H <sub>2</sub> O	L
771,8–775,8	4 000	773,8 (O <sub>2</sub> )	Кислород		O <sub>2</sub>	L
823,15–845,15	22 000	834,15 (O <sub>2</sub> )	Кислород		O <sub>2</sub>	N, C, L
850–854	4 000	852 (NO)			NO	L
857,9–861,9	4 000	859,9 (H <sub>2</sub> O)	Вода		H <sub>2</sub> O	L
866–882	16 000		Облака, окно			N, C
905,17–927,17	22 000	916,17 (H <sub>2</sub> O)	Вода		H <sub>2</sub> O	N, L
951–956	5 000	952 (NO), 955 (O <sup>18</sup> O)	Кислород		NO, O <sup>18</sup> O	L
968,31–972,31	4 000	970,3 (H <sub>2</sub> O)	Вода		H <sub>2</sub> O	L
985,9–989,9	4 000	987,9 (H <sub>2</sub> O)	Вода		H <sub>2</sub> O	L

<sup>(1)</sup> N: Надирный режим. Надирный режим сканирования ориентирован на зондирование или наблюдение поверхности Земли при углах, соответствующих почти нормальному падению. Сканирование завершается на поверхности или на разных уровнях в атмосфере в соответствии с весовыми функциями. L: Лимбовый режим. В лимбовых режимах сканирования атмосфера наблюдается "на краю". Сканирование завершается в космосе, а не на поверхности, и, соответственно, весовая функция равна нулю на поверхности и максимальному значению на высоте точки касания. C: Конический режим. В конических режимах сканирования поверхность Земли наблюдается с помощью вращающейся антенны при углах отклонения от направления на надир.

ТАБЛИЦА 3

**Основные молекулы для пассивного дистанционного зондирования  
на частотах ниже 1000 ГГц**

Молекула	Химическое название	Молекула	Химическое название	Молекула	Химическое название
BrO	Монооксид брома	CH <sub>3</sub> Cl	Метилхлорид	CH <sub>3</sub> CN	Ацетонитрил
ClO	Монооксид хлора	ClO <sub>2</sub>	Двуоксид хлора	CO	Монооксид углерода
H <sup>35</sup> Cl	Хлорид водорода	HCN	Цианистый водород	HDO	Оксид протодейтерия
HNO <sub>3</sub>	Азотная кислота	H <sub>2</sub> O	Вода	H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O	
HO <sub>2</sub>	Гидропероксид	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Пероксид водорода	HOCl	Гипохлористая кислота
NO	Оксид азота (II)	N <sub>2</sub> O	Оксид азота (I)	O <sub>3</sub>	Озон

## Приложение 1

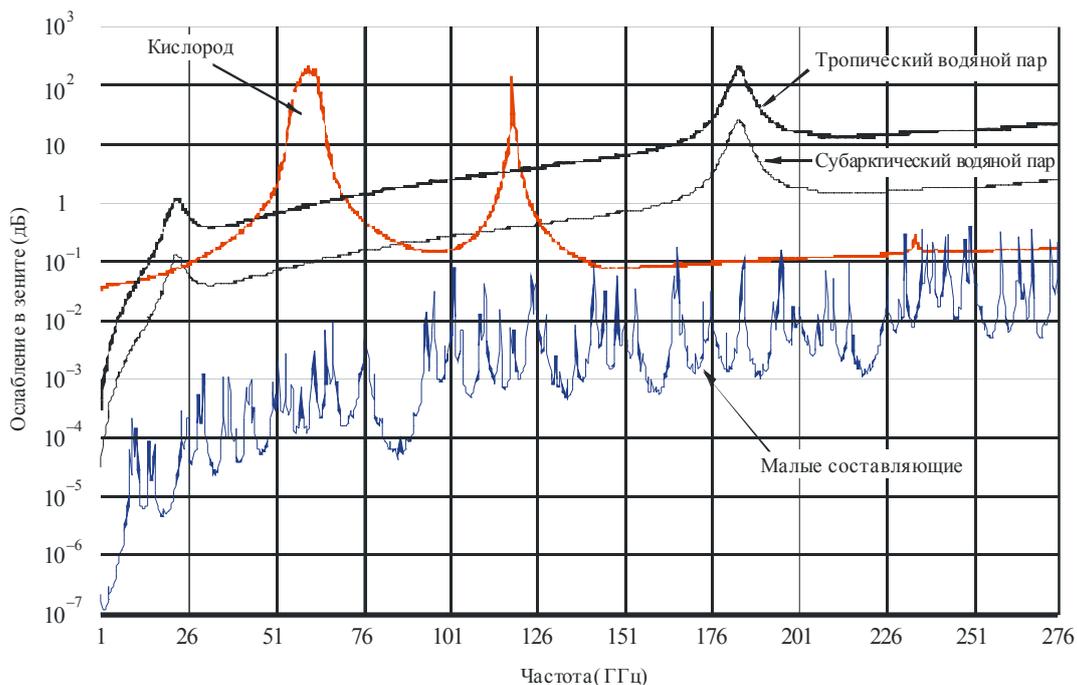
### Выбор частот для спутникового пассивного зондирования

#### 1 Введение

Энергия на микроволновых частотах испускается и поглощается поверхностью Земли и атмосферой над ее поверхностью. Свойства передачи поглощающей атмосферы являются функцией частоты, как показано на рис. 1a и 1b. На этих рисунках изображены вычисленные односторонние значения ослабления в зените (угол места –  $90^\circ$ ) для кислорода, водяного пара и малых составляющих. Вычисления приведены для трассы между поверхностью Земли и спутником. Эти вычисления показывают полосы частот, для которых атмосфера является действительно непрозрачной, и другие полосы частот, для которых атмосфера является почти прозрачной. Например, для надирного зондирования, области или окна, которые являются почти прозрачными, могут использоваться для зондирования поверхностных явлений. Области, которые являются непрозрачными, используются для зондирования атмосферы.

РИСУНОК 1a

Атмосферное ослабление в зените в зависимости от частоты, 1–275 ГГц

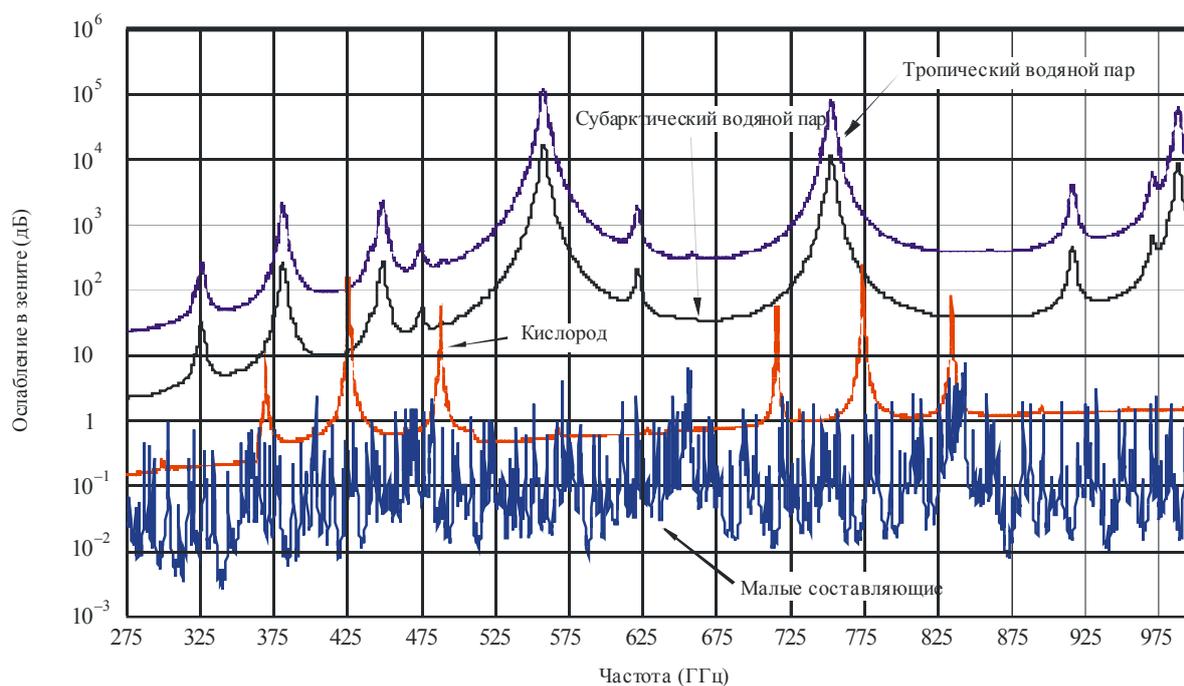


RS.0515-01a

Яркостная температура поверхности, атмосферная температура в точках вдоль трассы и коэффициенты поглощения неизвестны и должны быть определены по измерениям температуры антенны,  $T_A$ . Яркостная температура поверхности и коэффициенты поглощения в свою очередь зависят от физических свойств поверхности атмосферы, которые должны быть определены. Для оценки какого-либо одного физического параметра не может использоваться единственное наблюдение на какой-либо одной частоте. Прежде чем могут быть получены значения, наблюдения должны быть проведены одновременно на ряде частот и объединены с моделями частотной зависимости и зависимости физического параметра от яркостной температуры поверхности и коэффициента поглощения.

РИСУНОК 1b

## Атмосферное ослабление в зените в зависимости от частоты, 275–1000 ГГц



RS.0515-01b

Рабочие частоты для пассивных микроволновых датчиков определяются, прежде всего, явлениями, которые будут измеряться. Для некоторых применений, например, требующих измерений микроволновых излучений атмосферных газов, выбор частот весьма ограничен и определяется частотами спектральных линий газов. Другие применения имеют широкие частотные области, в которых могут быть определены явления.

## 2 Атмосферные измерения

В пределах отдельного атмосферного уровня постоянной температуры атмосферное ослабление не наблюдается. Измеренная температура антенны зависит главным образом от температуры в области, расположенной вдоль трасс, где ослабление (суммарное, до спутника) составляет менее 10 дБ, и немного зависит от температур в областях с очень малым ослаблением или большим суммарным ослаблением до спутника. Значения температуры могут определяться на различных высотах или расстояниях вдоль трасс с помощью выбора частот около краев непрозрачных областей с различными ослаблениями, которые обеспечивают различные весовые функции или множители для атмосферной температуры в данной точке,  $T(s)$ .

В целях обеспечения подходящего набора весовых функций для измерений профиля атмосферной температуры, водяного пара, озона, оксида хлора, оксида азота и монооксида углерода может быть выбран целый ряд различных частот. Что касается измерений четырех последних молекул, каждая отдельная линия не имеет достаточно тонкой структуры, как в полосе для создания профиля температуры  $O_2$ , или достаточной ширины, как в полосе водяного пара на частоте около 22,235 ГГц, чтобы измерять профиль около линии, с учетом налагаемых спутником ограничений по времени интегрирования. Следовательно, чтобы получить информацию о профиле применительно к этим составляющим, потребуется измерение нескольких линий.

В настоящее время профили атмосферных температур получают от бортовых зондирующих приборов, ведущих измерения в инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах (поглощение в кислороде вблизи 60 ГГц).

По сравнению с методами ИК-зондирования, наиболее важной особенностью, обеспечиваемой с помощью методов микроволнового зондирования, вероятно, является возможность измерения при любой погоде (способность бортового датчика "видеть" сквозь большинство облаков). Данная возможность является принципиальной для действующих применений прогнозирования погоды и атмосферных наук, так как, в среднем, более 60% земной поверхности полностью закрыто облаками, и только 5% любой области  $20 \times 20 \text{ км}^2$  (соответствующей типовой пространственной разрешающей способности ИК-датчиков) полностью свободно от облаков. Эта ситуация серьезно препятствует работе ИК-датчиков, которые имеют ограниченный доступ или не имеют никакого доступа к большим метеорологически активным областям.

Широкая непрозрачная область между 50 и 66 ГГц состоит из ряда узких (непрозрачных) линий поглощения, и наблюдения могут осуществляться на краях блока линий или в окрестности минимума между линиями. Следующий спектр поглощения  $\text{O}_2$  вблизи 118 ГГц имеет более низкий потенциал из-за его специфической структуры (монохроматической по сравнению с обширной многолинейчатой структурой вблизи 60 ГГц) и более сильного воздействия ослабления, вызванного влажностью атмосферы.

Облака и дождь могут обеспечивать дополнительное ослабление, когда они возникают вдоль трассы. Дождь и облака могут определяться в атмосферных окнах между 5 и 150 ГГц. Чтобы различить дождь и облака и отделить эти явления от излучения поверхности требуются многочисленные наблюдения в широком диапазоне частот.

Для получения профилей концентрации элементов, содержащихся в очень малых количествах, которые важны для исследований атмосферной химии, может применяться конфигурация лимбового зондирования, т. е. зондирования на основе тангенциального наблюдения атмосферы с помощью прибора, установленного на спутнике или воздушном судне. Лимбовое зондирование является более чувствительным и обеспечивает более высокую разрешающую способность по вертикали, чем надирное зондирование. Субмиллиметровые частоты приблизительно от 500 ГГц и выше обеспечивают возможность зондирования вплоть до нижних слоев стратосферы. Миллиметровые частоты, в особенности между 180 и 360 ГГц, позволяют осуществлять зондирование до еще меньших высот, т. е. до верхних слоев тропосферы.

### 3 Измерения суши и океана

Излучение от поверхности Земли передается через атмосферу на спутник. При высоких значениях ослабления это излучение не может быть определено. При низких значениях, требуемых для температурного зондирования самого нижнего слоя атмосферы, поверхностная и атмосферная составляющие излучения объединены, и для разделения двух типов составляющих требуются дополнительные измерения в каналах окна. Излучение поверхности пропорционально температуре и коэффициенту излучения поверхности, который связан с ее диэлектрическими свойствами и неровностью рельефа. Если коэффициент излучения меньше единицы, поверхность излучает и рассеивает радиацию. Рассеянная радиация порождается нисходящим излучением атмосферы, возникающим над поверхностью. В канале окна с очень малыми значениями ослабления составляющая рассеянной радиации пренебрежимо мала; в противном случае она должна учитываться.

В отличие от излучения линий поглощения в атмосфере яркостные температуры поверхности резко не изменяются с частотой. В связи с относительно слабой частотной зависимостью явлений, обусловленных параметрами поверхности, для определения их значений требуются одновременные наблюдения в широком диапазоне частот в пределах атмосферных окон. Разделение параметров можно осуществить только тогда, когда они имеют различные частотные зависимости. Яркостная температура поверхности океана – это функция солёности, температуры и ветра. Ветер воздействует на яркостную температуру через образование неровностей на поверхности и пены, диэлектрические свойства которой отличаются от свойств находящейся ниже воды. Солёность лучше всего определять на частотах ниже 3 ГГц, и, если требуется высокая точность измерения, то на частотах ниже 1,5 ГГц. Для определения температуры поверхности моря лучше всего использовать частоты в диапазоне от 3 до 10 ГГц, при этом почти оптимальной является частота 5 ГГц. Ветер воздействует на наблюдения практически на всех частотах, но лучше всего определяется на частотах выше 15 ГГц.

Поверхностные слои льда или пятна нефти, плавающие на поверхности океана, имеют диэлектрические свойства, отличные от свойств воды, и могут быть определены за счет возникающего изменения яркостной температуры. Нефтяные пятна могут изменять яркостную температуру больше чем на 50 К на частотах выше 30 ГГц, а лед может изменять яркостную температуру больше чем на 50 К на частотах от 1 до 40 ГГц. Несмотря на то, что лед и разливы нефти могут приводить к большому изменению яркостной температуры, требуется выполнение ряда наблюдений в каждом из атмосферных окон, чтобы отделить влияние льда и нефти от влияния дождя и облаков.

Содержание влаги в поверхностных слоях можно установить на микроволновых частотах. Яркостная температура снега и почвы изменяется при изменении содержания влаги и частоты. Как правило, чем ниже частота, тем больше толщина слоя, которую можно определить. Так как влажность на поверхности связана с профилем влажности ниже поверхности, наблюдения на более высоких частотах могут также представлять интерес. При определении таяния снега около поверхности большую часть информации обеспечивают наблюдения на частотах 37 ГГц и выше. Для зондирования почвы, особенно почвы под растительным покровом, наибольший интерес представляют частоты ниже 3 ГГц. На практике, требуется целый ряд частот, чтобы, во-первых, классифицировать поверхность по неровности, растительному покрову, возрасту морского льда и т. д. и, во-вторых, измерить параметры, например толщину льда или содержание влаги.

## Приложение 2

### Факторы, связанные с определением требуемой ширины полосы

#### 1 Чувствительность радиометрических приемников

Радиометрические приемники определяют шумоподобное тепловое излучение, принятое антенной, и тепловой шум приемника. Путем интегрирования принятого сигнала можно уменьшить случайные флуктуации шума и получить точные оценки суммарной мощности шума приемника и шума внешнего теплового излучения. Выразив мощность шума на единицу ширины полосы через эквивалентную шумовую температуру, можно выразить влияние интегрирования на уменьшение неопределенности измерения с помощью следующего уравнения:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha(T_A + T_N)}{\sqrt{B\tau}},$$

где:

- $\Delta T_e$ : радиометрическая разрешающая способность (среднеквадратичная неопределенность в оценке полного шума системы,  $T_A + T_N$ );
- $\alpha$ : постоянная приемной системы,  $\geq 1$ , в зависимости от конструкции системы;
- $T_A$ : температура антенны;
- $T_N$ : шумовая температура приемника;
- $B$ : спектральная разрешающая способность спектрометрического канала или ширина полосы одного радиометрического канала;
- $\tau$ : время интегрирования.

Постоянная приемной системы,  $\alpha$ , является функцией от типа системы обнаружения. Для радиометров суммарной мощности, используемых в датчиках спутниковой службы исследования Земли, данная постоянная не может быть меньше единицы. На практике, в большинстве современных радиометров суммарной мощности эта величина стремится к единице.

На длинах волн более 3 см можно получить шумовую температуру приемника менее 150 К с использованием твердотельных параметрических усилителей. На длинах волн менее 3 см наиболее распространенным типом приемника, используемым в настоящее время, является супергетеродин с шумовой температурой в пределах от нескольких сот градусов при длине волны 3 см приблизительно до 2000 К при длине волны 3 мм. Совершенствование технологии транзисторов с высокой подвижностью электронов сделает возможным применение малошумящих предварительных усилителей с шумовой температурой приемника около 300 К при длине волны 5 мм.

Уменьшения шумовой температуры приемника можно добиться с помощью внедрения малошумящих предварительных усилителей. Помимо этого, существенное уменьшение значений  $\Delta T_e$  (или увеличение чувствительности) бортовых радиометров может быть получено только за счет увеличения ширины полосы системы и использования конфигурации приборов, обеспечивающей оптимизацию времени интегрирования. В зависимости от требуемой пространственной разрешающей способности, время интегрирования низкоорбитальных бортовых радиометров ограничено из-за относительной скорости космического аппарата значениями порядка нескольких секунд или меньшего порядка.

## 2 Характеристики пассивных датчиков

Типовым датчиком, используемым для измерения различных свойств атмосферы и поверхности, является сканирующий датчик. Благодаря использованию датчиков с веерным сканированием можно добиться увеличения ширины зоны охвата и уменьшения ширины полосы. В связи с возможностью обеспечить более длительное время интегрирования при наблюдении, можно также получить меньшие значения  $\Delta T_e$ .

Требования к ширине полосы пассивных датчиков, измеряющих газовые примеси в атмосфере, определяются шириной линий наблюдаемых газов и возможностью наблюдения в одном и том же окне нескольких линий одинаковых или разных газов.

Ширина линий излучения атмосферных газов зависит в основном от давления. Данная зависимость обуславливает минимальные требования к ширине полосы, а также к разрешающей способности. На уровне земли ширина линий составляет порядка нескольких гигагерц. В стратосфере ширина уменьшается до нескольких мегагерц. В связи с большой шириной линий на меньших высотах, лимбовым зондам миллиметрового диапазона (выше 100 ГГц), измеряющим верхние слои атмосферы, требуются очень широкие полосы, составляющие порядка 10 ГГц.

Были проведены исследования с целью определения требований к чувствительности датчиков, пространственной разрешающей способности, времени интегрирования и спектральной разрешающей способности. Эти требования представлены в Рекомендации МСЭ-R RS.2017.

---