

التوصية ITU-R RS.515-6

(2026/06)

السلسلة RS: أنظمة الاستشعار عن بُعد

نطاقات الترددات وعروض النطاق المستخدمة
للاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل

تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

حقوق الملكية الفكرية

يستعري الاتحاد الانتباه إلى أن تطبيق هذه التوصية أو تنفيذها قد يستلزم استعمال حق من حقوق الملكية الفكرية. ولا يتخذ الاتحاد أي موقف من القرائن المتعلقة بحقوق الملكية الفكرية أو صلاحيتها أو نطاق تطبيقها سواء طالب بها عضو من أعضاء الاتحاد أو طرف آخر لا تشمله عملية إعداد التوصيات. وعند الموافقة على هذه التوصية، كان الاتحاد قد تلقى إخطاراً بملكية فكرية تحميها براءات الاختراع يمكن المطالبة بها لتنفيذ هذه التوصية. ومع ذلك، ونظراً إلى أن هذه المعلومات قد لا تكون هي الأحدث، يوصى المسؤولون عن تنفيذ هذه التوصية بالاطلاع على معلومات براءات الاختراع ذات الصلة لقطاع الاتصالات الراديوية المتاحة في الموقع الإلكتروني: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/Pages/itu-r-patent-information.aspx>.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <https://www.itu.int/pub/R-REC/ar>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة التحديد الراديوي للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني
جنيف، 2026

التوصية ITU-R RS.515-6

نطاقات الترددات وعروض النطاق المستخدمة للاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل

(1978-1990-1994-1997-2003-2012-2026)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية معلومات عن نطاقات الترددات وعروض النطاق المستخدمة للاستشعار المنفعل عن بُعد بالأرض وغلافها الجوي بواسطة السواتل، من أجل أجهزة الاستشعار المنفعل بالموجات الصغيرة.

مصطلحات أساسية

خدمة استكشاف الأرض الساتلية (المنفعله)، قياسات، خطوط طيفية، عرض النطاق المطلوب

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) أن للبيانات المتعلقة بالبيئة الأرضية أهمية متزايدة؛

(ب) أن سواتل استكشاف الأرض وسواتل الأرصاد الجوية تجري الاستشعار المنفعل عن بُعد بالموجات الصغيرة في بعض النطاقات الموزعة لهذا الغرض وفقاً للوائح الراديو (RR)؛

(ج) أن بعض هذه النطاقات موزع أيضاً لخدمات اتصالات راديوية أخرى؛

(د) أن الحماية من التداخل في بعض الترددات أساسية للاستشعار المنفعل عن بُعد وتطبيقاته؛

(هـ) أن لبعض النطاقات في ترددات معينة أهمية خاصة لقياسات بعض الخطوط الطيفية؛

(و) أنه لقياسات مختلفة للاستشعار المنفعل عن بُعد تستعمل نطاقات ترددات معينة لا يمثل موقعها المحدد في الطيف أهمية حرجية طالما يكون توزيع الترددات المركزية منتظماً بالطيف؛

(ز) أن متطلبات الاستشعار المنفعل عن بُعد يجب أن تُستعرض دورياً، نظراً لاستمرار التطور التكنولوجي والعلمي في النطاقات من 275 GHz إلى 3 000 GHz؛

(ح) أن ثلاث فئات رئيسية من أجهزة الاستشعار المنفعل يمكن تحديدها لاستخدام النطاقات من 275 GHz إلى 3 000 GHz:

(1) أجهزة سبر الغلاف الجوي العمودية ثلاثية الأبعاد التي تتطلب بيانات ذات موثوقية عالية جداً واستبانة متوسطة عبر قنوات متعددة؛

(2) مقاييس الإشعاع التصويرية التي تتطلب بيانات ذات موثوقية عالية واستبانة متوسطة عبر قنوات وحيدة ذات عرض نطاق واسع نسبياً؛

(3) أجهزة سبر حافة الغلاف الجوي الأعلى التي تتطلب بيانات ذات موثوقية متوسطة واستبانة عالية جداً عبر قنوات عديدة ذات عرض نطاق ضيق؛

(ط) أن أيّاً من متطلبات الأداء يجب أن يعتمد على المتطلبات العلمية المعروفة للقياس، ولذلك يجب أن تكون استبانة البيانات ومستويات التيسر ذات معنى علمي فيما يتعلق بالتطبيقات التي تُستخدم من أجلها (مثل التنبؤ وعمليات رصد السطح ومراقبة المناخ)،

وإذ تلاحظ

- (أ) أن من غير العملي تحديد نطاقات فردية مناسبة للاستشعار المنفعل عن بُعد ضمن مجال 3 000-1 000 GHz، نظراً لكثرة الخطوط الطيفية التي تتم عمليات رصد الأرض في هذا المدى؛
- (ب) أن الغلاف الجوي في المدى 3 000-1 000 GHz مسدود أمام أي بث بحيث يتعذر الرصد من الناحية العملية إلا عن طريق سبر حافة الغلاف الجوي الأعلى؛
- (ج) أن الحماية الكافية لعمليات الاستشعار عن بُعد المنفعله مضمونة أساساً، والتشارك في الترددات ممكن مع أي خدمة اتصالات راديوية أرضية، بسبب كثافة الغلاف الجوي في المدى 3 000-1 000 GHz،

توصي

بأن تستعمل نطاقات الترددات وما يرتبط بها من عروض النطاقات المبينة في الجدول 1 في النطاقات ما دون 275 GHz للاستشعار المنفعل بالخصائص البرية والبحرية والجوية في كوكب الأرض، وأن تُستعمل النطاقات ما بين 275 GHz و 1 000 GHz المبينة في الجدول 2 لأغراض الاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل، على أساس الملحقين 1 و2.

الجدول 1

نطاقات الترددات للاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل ما دون 275 GHz

نطاق (نطاقات) الترددات (GHz)	مجمّل عرض النطاق اللازم (MHz)	الخط الطيفي (الخطوط الطيفية) أو التردد المركزي (GHz)	القياسات (الأرصاء الجوية-ظواهر المناخ، كيمياء) (انظر الجدول 3)	أسلوب المسح النمطي ⁽¹⁾ L، C، N
1,427-1,37	57	1,4	رطوبة التربة، ملوحة المحيط، حرارة سطح البحر، مؤشر الغطاء النباتي	C، N
2,7-2,64	60	2,67	ملوحة المحيط، رطوبة التربة، مؤشر الغطاء النباتي	N
4,4-4,2	200	4,3	حرارة سطح البحر	C، N
4,99-4,95	40	4,97	حرارة سطح البحر	C، N
7,25-6,425	400 ⁽²⁾	6,85	حرارة سطح البحر	C، N
10,7-10,6	100	10,65	معدل الأمطار، محتوى الماء الثلجي، تشكل الجليد، حالة البحر، سرعة رياح المحيط	C، N
15,4-15,2	200	15,3	بخار الماء، معدل الأمطار	C، N
18,8-18,6	200	18,7	معدلات الأمطار، حالة البحر، جليد البحر، بخار الماء، سرعة رياح المحيط، إشعاعية ورطوبة التربة	C، N
21,4-21,2	200	21,3	بخار الماء، الماء السائل	N
22,5-22,21	290	22,235	بخار الماء، الماء السائل	C، N
24-23,6	400	23,8	بخار الماء، الماء السائل، القناة المرتبطة لسبر الغلاف الجوي	C، N
31,8-31,3	500	31,4	جليد البحر، بخار الماء، البقع النفطية، السحب، الماء السائل، حرارة السطح، النافذة المرجعية للمدى GHz 60-50	C، N
37-36	1 000	36,5	معدلات الأمطار، ثلج، جليد البحر	C، N
50,4-50,2	200	50,3	نافذة السحاب المرجعية لتحديد نمط حرارة الغلاف الجوي (حرارة السطح)	C، N

الجدول 1 (تتمة)

نطاق (نطاقات) الترددات (GHz)	مجمّل عرض النطاق اللازم (MHz)	الخط الطيفي (الخطوط الطيفية) أو التردد المركزي (GHz)	القياسات (الأرصاء الجوية-ظواهر المناخ، كيمياء) (انظر الجدول 3)	أسلوب المسح التمطي (¹) L, C, N
59,3-52,6	6 700	عدة خطوط ما بين 59,3-52,6	تحديد نمط حرارة الغلاف الجوي (خطوط امتصاص O ₂)	C, N
92-86	6 000	89	سحب، بقع نقطية، جليد، ثلج، مطر، نافذة مرجعية لسير الحرارة قرب 118 GHz	C, N
102-100	2 000	100,49	NO, N ₂ O	L
111,8-109,5	2 300	110,8	O ₃	L
122,25-114,25	8 000	118,75	CO, تحديد نمط حرارة الغلاف الجوي (خطوط امتصاص O ₂)	L, C, N
151,5-148,5	3 000	150,74	N ₂ O, حرارة سطح الأرض، معلمات السحاب، نافذة مرجعية للسير الحراري	L, N
167-164	3 000	167,2, 164,38	N ₂ O, ماء وجليد السحب، مطر، CO, ClO	L, C, N
191,8-174,8	17 000	177,26, 175,86 184,75, 183,31	N ₂ O, تحديد نمط بخار الماء، O ₃	L, C, N
209-200	9 000	203,4, 200,98 206,13, 204,35 208,64	ClO, N ₂ O, بخار الماء، O ₃	L
231,5-226	5 500	230,54, 226,09 231,28	سحب، رطوبة، N ₂ O (226,09 GHz)، O ₃ (231,28 GHz)، CO (230,54 GHz) نافذة مرجعية	L, N
238-235	3 000	237,15, 235,71	O ₃	L
242,2-239,2	3 000	240,7	جسيمات السحب الجليدية	C
247,2-244,2	3 000	245,7	جسيمات السحب الجليدية	C
252-250	2 000	251,21	N ₂ O	L

(¹) N: نظير السمّت، تركز أساليب مسح نظير السمّت على السبر أو مشاهدة سطح الأرض في زوايا ورود متعددة بما في ذلك ورود عمودي.
L: طرف، تشاهد أساليب مسح الطرف الغلاف الجوي "على الحافة" وتنتهي في الفضاء وليس على السطح، وبالتالي فإن ترجيحها صفر على السطح وفي حده الأقصى في ذروة نقطة المماس. C: مخروطي، تشاهد أساليب المسح المخروطي سطح الأرض بتدوير الهوائي بزاوية تخالف من اتجاه نظير السمّت. وينتهي المسح عند السطح أو في مستويات متنوعة في الغلاف الجوي وفقاً لدوال الترجيح.

(²) عرض النطاق هذا هو عرض النطاق المطلوب لأجهزة الاستشعار ضمن المدى الترددي الوارد في العمود 1.

الجدول 2

نطاقات الترددات ما بين 275 GHz و 1 000 GHz لأغراض الاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل

أسلوب المسح النمطي 'C، 'N 'L ⁽¹⁾	القياسات			الخط الطيفي (الخطوط الطيفية) (GHz) (انظر الجدول 3)	مجموع عرض النطاق اللازم (MHz)	نطاق (نطاقات) الترددات (GHz)
	كيمياء	النافذة (GHz)	الأرصاء الجوية - ظواهر المناخ			
L	ClO، N ₂ O	285,4-276,4		،(N ₂ O) 276,33 (ClO) 278,6	11 000	286-275
L، 'N	أوكسجين 'HOCl، 'HNO ₃ 'O ₃ ، 'N ₂ O 'O ¹⁷ O	306-296	قناة جناح لسير الحرارة	نافذة من أجل '298,5، '325,1 '300,22، ('HNO ₃) '301,44، ('HOCl) '،(N ₂ O) '،(O ₃) 303,57 '،(O ¹⁷ O) 304,5 '(HNO ₃) 305,2	10 000	306-296
L، 'C، 'N	'ClO، 'HDO 'H ₂ O، 'HNO ₃ 'HOCl، 'O ₃ 'O ¹⁸ O، 'CH ₃ Cl 'BrO، 'CO 'N ₂ O، 'CH ₃ CN HCN	348,5-339,5	تحديد نمط بخار الماء، سحب، قناة جناح لسير الحرارة	،(HDO) 313,8 '346,9، '315,8 '{ 352,9، '344,5 '318,8 }، ('ClO) '{ 344,5، '345,8 '،(HNO ₃) '{ 325,15، '321,15 } '321 }، ('H ₂ O) '352,3، '345,5 '{ 352,8، '352,6 '322,8 }، ('O ₃) '،(HOCl) { 343,4 '، { 345,4، '345,0 } '345,0 (CH ₃ Cl) '345,8، ('O ¹⁸ O) '،(BrO) 346، ('CO) '،(CH ₃ CN) 349,4 '،(N ₂ O) 351,67 '(HCN) 354,5	43 000	356-313
L، 'N	O ₃		قناة جناح لتحديد نمط بخار الماء	(O ₃) 364,32	4 000	365-361
L، 'N	H ₂ O		تحديد نمط بخار الماء	(H ₂ O) 380,2	23 000	392-369
L، 'N			تحديد نمط بخار الماء		2 000	399-397
L			سير الحرارة		2 000	411-409
L، 'N	O ₂		أكسجين، تحديد نمط الحرارة	(O ₂) 424,7	18 000	434-416
C، 'L، 'N	'H ₂ O، 'HNO ₃ CO، 'N ₂ O، 'O ₃	466,3-458,5	تحديد نمط بخار الماء، سحب	،(HNO ₃) 442 '{ 448، '443,1 } '443,2، ('H ₂ O) '452,09، ('O ₃) '461,04، ('N ₂ O) '(CO)	28 000	467-439

الجدول 2 (تابع)

أسلوب المسح النمطي 'C ، 'N 'L	القياسات			الخط الطيفي (الخطوط الطيفية) (GHz) (انظر الجدول 3)	مجموع عرض النطاق اللازم (MHz)	نطاق (نطاقات) الترددات (GHz)
	كيميائية	النافذة (GHz)	الأرصاء الجوية - ظواهر المناخ			
N ، L	'N ₂ ¹⁸ O ، 'BrO O ₃	502-498	قناة جناح لتحديد نمط بخار الماء	{ 497,9 ، 497,6 } 497,9 ، ('BrO) 498,6 ، ('N ₂ ¹⁸ O) (O ₃)	5 000	502-497
N		527-523	قناة جناح لتحديد نمط بخار الماء	نافذة من أجل 556,9	4 000	527-523
L ، N	'O ₃ ، 'HNO ₃ 'ClO ، 'H ₂ O	542-538	تحديد نمط بخار الماء	{ 542,35 ، 541,26 } { 556,98 ، 550,90 '(HNO ₃) '566,29 ، 544,99 } '(O ₃) { 571,0 '(H ₂ O) 556,93 '(ClO) 575,4	43 000	581-538
L	'أكسجين ، 'H ₂ O 'SO ₂ ، 'ClO ₂ 'BrO ، 'HNO ₃ 'CH ₃ CN '(H ³⁷ Cl) 'HOCl ، 'H ₂ O ₂ 'HO ₂ ، 'O ₃ 'CH ₃ Cl ، 'H ³⁵ Cl O ¹⁸ O		تحديد نمط بخار الماء ، أكسجين	'(H ₂ O) 620,7 '(ClO ₂) 624,27 '624,89 ، 624,34 } '{ 626,17 ، 625,84 '624,48 } ، ('SO ₂) '(HNO ₃) { 624,78 '(' ⁸¹ BrO) 624,77 '(CH ₃ CN) 624,8 '(H ³⁷ Cl) 624,98 '(H ₂ O ₂) 625,04 '{ 628,46 ، 625,07 } '625,37 ، ('HOCl) '625,66 ، ('O ₃) '625,92 ، ('HO ₂) '627,18 ، ('H ³⁵ Cl) '627,77 ، ('CH ₃ Cl) '(O ¹⁸ O)	19 000	630-611
N ، L	'H ₂ ¹⁸ O ، 'HOCl 'ClO ، 'SO ₂ 'BrO ، 'HO ₂ 'O ₃ ، 'HNO ₃ N ₂ O ، 'NO	651-634,8	قناة جناح لتحديد نمط بخار الماء	'(HOCl) 635,87 '(H ₂ ¹⁸ O) 647,1 '(SO ₂) 649,24 '(ClO) 649,45 '(HO ₂) 649,7 '(' ⁸¹ BrO) 650,18 '(HNO ₃) 650,28 '(O ₃) 650,73 '(NO) 651,77 '(N ₂ O) 652,83	20 000	654-634

الجدول 2 (تتمة)

أسلوب المسح النمطي C، N (L)	القياسات			الخط الطيفي (الخطوط الطيفية) (GHz) (انظر الجدول 3)	مجموع عرض النطاق اللازم (MHz)	نطاق (نطاقات) الترددات (GHz)
	كيميائية	النافذة (GHz)	الأرصاء الجوية - ظواهر المناخ			
C، N، L	HO ₂ ، H ₂ O ، CH ₃ Cl، ClO CO	689,5-676,5	تحديد نمط بخار الماء، سحب	(H ₂ O) 658 (HO ₂) 660,49 (ClO) 687,7 (CH ₃ Cl) 688,5 (CO) 691,47	35 000	692-657
L	O ₂		أكسجين	(O ₂) 715,4	5 000	718-713
L	O ¹⁸ O، HNO ₃		أكسجين	(HNO ₃) 731 (O ¹⁸ O) 731,18	4 000	733-729
L	H ₂ O		ماء	(H ₂ O) 752	4 000	754-750
L	O ₂		أكسجين	(O ₂) 773,8	5 000	776-771
L، C، N	O ₂		أكسجين	(O ₂) 834,15	23 000	846-823
L	NO			(NO) 852	4 000	854-850
L	H ₂ O		ماء	(H ₂ O) 859,9	5 000	862-857
C، N			سحاب، نافذة		16 000	882-866
L، N	H ₂ O		ماء	(H ₂ O) 916,17	23 000	928-905
L	O ¹⁸ O، NO		أكسجين	(NO) 952 (O ¹⁸ O) 955	5 000	956-951
L	H ₂ O		ماء	(H ₂ O) 970,3	5 000	973-968
L	H ₂ O		ماء	(H ₂ O) 987,9	5 000	990-985

(1) N: نظير السميت، تركز أساليب مسح نظير السميت على السير أو مشاهدة سطح الأرض في زوايا ورود متعددة بما في ذلك ورود عمودي. L: طرف، تشاهد أساليب مسح الطرف الغلاف الجوي "على الحافة" وتنتهي في الفضاء وليس على السطح، وبالتالي فإن ترجيحها صفر على السطح وفي حده الأقصى في ذروة نقطة المماس. C: مخروطي، تشاهد أساليب المسح المخروطي سطح الأرض بتدوير الهوائي بزاوية تحالف من اتجاه نظير السميت. وينتهي المسح عند السطح أو في مستويات متنوعة في الغلاف الجوي وفقاً لدوال القناة.

الجدول 3

الجزئيات الرئيسية للاستشعار المنفصل عن بُعد ما دون 1 000 GHz

الاسم الكيميائي	الجزئي	الاسم الكيميائي	الجزئي	الاسم الكيميائي	الجزئي
الأسيتونيترييل	CH ₃ CN	كلوريد الميثيل	CH ₃ Cl	أول أكسيد البروم	BrO
أول أكسيد الكربون	CO	ثاني أكسيد الكلور	ClO ₂	أول أكسيد الكلور	ClO
أكسيد الديوتيريوم البروتيوم	HDO	زرنيخ الهيدروجين	HCN	كلوريد الهيدروجين	H ³⁵ Cl
ماء مُثرى بالأكسجين	H ₂ ¹⁸ O	ماء	H ₂ O	حمض النيتريك	HNO ₃
حمض تحت الكلور	HOCl	ماء الأوكسجين	H ₂ O ₂	فوق أكسيد الهيدروجين	HO ₂
الأوزون	O ₃	أكسيد النيتروز	N ₂ O	أكسيد النيتريك	NO
				الأكسجين الجزيئي	O ₂

الملحق 1

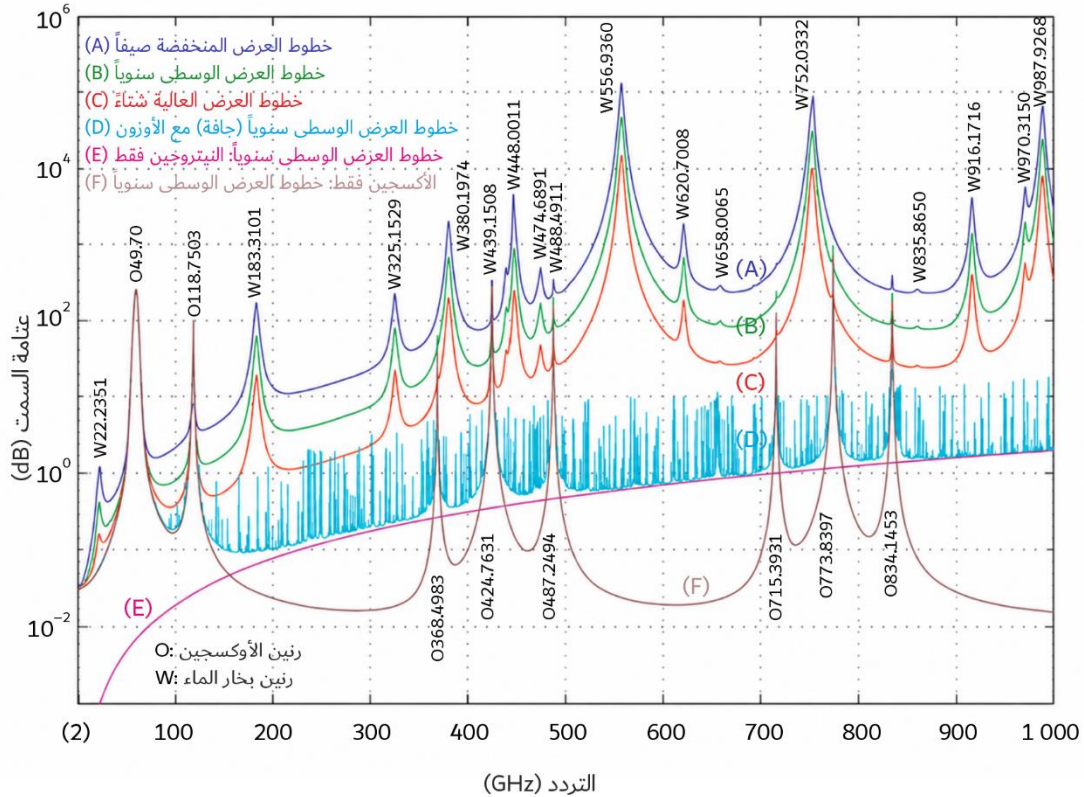
اختيار ترددات الاستشعار المنفعل عن بُعد بالسواتل

1 مقدمة

تُثبت طاقة الترددات الصغيرة وتمتص على سطح الأرض وفي الغلاف الجوي فوقه. وتتغير خصائص الإرسال في الغلاف الجوي الممتص حسب التردد كما يتضح في الشكل 1. ويبين هذا الشكل القيم المحسوبة للتوهين على مسير سمّي باتجاه واحد (زاوية الارتفاع 90°) للأكسجين وبخار الماء ومكونات ثانوية. وهذه الحسابات هي لمسير بين السطح عند مستوى سطح البحر والساتل. وتظهر هذه الحسابات نطاقات الترددات التي يكون الغلاف الجوي مسدوداً أمامها فتعجز عن اختراقه، ونطاقات ترددات أخرى يكاد يكون الغلاف الجوي مفتوحاً أمامها. ففي سبر نظير السمّت على سبيل المثال، يمكن استخدام المناطق أو النوافذ شبه المفتوحة لرصد ظواهر على سطح الأرض، فيما تُستخدم المناطق المسدودة لرصد الغلاف الجوي.

الشكل 1

التوهين السمّي الجوي مقابل التردد، 1-1000 GHz



RS.0515-01

ودرجة حرارة لمعان السطح وحرارة الغلاف الجوي بنقاط على طول المسير وكذلك معاملات الامتصاص غير معروفة وينبغي استخلاصها من قياسات درجة حرارة الهوائي T_A . وتعتمد حرارة لمعان السطح ومعاملات الامتصاص على خصائص طبيعية للسطح أو الغلاف الجوي الذي تجري دراسته. ولا يمكن بمجرد رصد تردد واحد تقدير معلمة فيزيائية واحدة. لذلك، قبل أن يتسنى التوصل إلى حلول، ينبغي رصد عدة ترددات في نفس الوقت ودمج النتائج بنماذج لتغير حرارة لمعان السطح وتغير معاملات الامتصاص حسب الترددات وحسب المسميات الفيزيائية.

وتحدد ترددات تشغيل أجهزة الاستشعار المنفصلة العاملة بالموجات الصغيرة أساساً بالظواهر المراد قياسها. وفي بعض التطبيقات، مثل تلك التي تتطلب قياس انبعاثات الموجات الصغيرة من غازات الغلاف الجوي، يكون اختيار الترددات مقيداً للغاية وتحدده ترددات الخطوط الطيفية للغازات. أما التطبيقات الأخرى فتتوفر لها نطاقات تردد واسعة يمكن فيها استشعار الظواهر.

2 قياسات الغلاف الجوي

لا يحدث التوهين الجوي داخل طبقة جوية واحدة ذات درجة حرارة ثابتة. وتتوقف درجة حرارة الهوائي المقيسة، في الغالب، على درجة الحرارة في المنطقة الواقعة على طول المسير حيث يكون التوهين (الكلي إلى الساتل) أقل من 10 dB، ولا تتأثر إلا بدرجة ضئيلة بدرجات الحرارة في المناطق التي يكون فيها التوهين ضعيفاً جداً أو يكون فيها التوهين الكلي إلى الساتل كبيراً. ويمكن قياس قيم درجة الحرارة على ارتفاعات أو مسافات مختلفة على طول مسير باختيار ترددات على حدود مناطق مسدودة بقيم توهين مختلفة تعطي دالات مرجحة أو معاملات ضرب مختلفة للحرارة الجوية $T(s)$ في نقطة معينة.

ويمكن اختيار عدد من الترددات المختلفة للتوصل إلى مجموعة معقولة من دالات الترجيح لقياسات حرارة الغلاف الجوي وبخار الماء والأوزون وأوكسيد الكلورين والأوكسيد النيتري وأول أكسيد الكربون. وبالنسبة لقياسات الجزئيات الأربعة الأخيرة فليس لكل خط بنية دقيقة بشكل كاف كما في نطاق تحديد نمط حرارة O_2 وعرض النطاق لا يكفي كما هو الحال في نطاق بخار الماء البالغ حوالي 22,235 GHz بحيث يمكن قياس البيانات الوصفية على خط واحد مع مراعاة القيود التي يفرضها الساتل فيما يتعلق بوقت الدمج. لذلك هناك حاجة إلى قياسات بعدة خطوط حتى يمكن الحصول على معلومات تحديد نمط بشأن هذه العناصر المكونة.

ويمكن الحصول حالياً على البيانات الوصفية للحرارة الجوية من أجهزة سبر تحمل جواً وتقيس في أطيايف ما تحت الحمراء (IR) وصغيرة الموجة (ويلبغ الامتصاص الأكسجيني 60 GHz و 183 GHz).

وإذا ما قورنت بتقنيات الأشعة ما تحت الحمراء (IR)، فإن القدرة العاملة في كل الأحوال الجوية (قدرة جهاز الاستشعار المحمول جواً على "النظر" عبر أكثرية السحب) هي أهم خاصية تقدمها التقنيات بموجة صغيرة. وهذا عنصر أساسي للتنبؤ العملي بالطقس وتطبيقات العلوم الجوية نظراً إلى أن أكثر من 60% من سطح الأرض في المتوسط مغطى بالسحب بشكل كامل و فقط 5% من أي نقطة $20 \times 20 \text{ Km}^2$ (بما يقابل الاستبانة الفضائية النمطية للمسابر العاملة بالأشعة ما تحت الحمراء) خال من السحب. وتعيق هذه الحالة بشدة تشغيل المسابر العاملة بالأشعة ما تحت الحمراء التي لا يكون لها إلا نفاذ صغير أو لا نفاذ على الإطلاق إلى مناطق واسعة عالية النشاط في الأرصاد الجوية.

والمنطقة العريضة المسدودة ما بين 50 GHz و 66 GHz تتكون من عدد من خطوط الامتصاص الضيقة (المسدودة) ويمكن إجراء عمليات رصد إما على حواف مجمع الخطوط أو في الوديان بين الخطوط. ويقل كمون الطيف لامتصاص O_2 حول التردد 118 GHz بسبب بنيته الخاصة (أحادية اللون مقارنة بالتركيبية الغنية متعددة الألوان على مقربة من 60 GHz) ويتأثر بدرجة أكبر بالتوهين الذي تسببه الرطوبة الجوية.

ويمكن أن تؤدي السحب والأمطار إلى المزيد من التوهين عند ظهورها على طول المسير. ويمكن استشعار الأمطار والسحب في نوافذ الغلاف الجوي بين 5 و 150 GHz. وهناك حاجة إلى إجراء عدة رصدات على مدى ترددات واسع لفصل الأمطار عن السحب وفصل آثارها عن البث المنبعث من سطح الأرض.

ويمكن استخدام هندسة سبر حافة الغلاف الجوي الأعلى، أي رصد الغلاف الجوي على خط المماس، من جهاز ساتلي أو محمول جواً لاستخراج البيانات الوصفية لتركيز أنواع التبع المفيدة لاستقصاء كيمياء الغلاف الجوي. وسبر حافة الغلاف الجوي الأعلى أكثر حساسية ويتيح استبانة عمودية أعلى بالمقارنة مع سبر نظير السم. وفي الترددات القريبة من 500 GHz فأعلى بأطوال الموجة ما دون المليمترية، يمكن الهبوط بالسبر إلى طبقة الستراتوسفير السفلى. وفي الترددات ذات أطوال الموجة المليمترية، ولا سيما ما بين 180 و 360 GHz، يمكن التوغل في الهبوط بالسبر، أي وصولاً إلى طبقة التروبوسفير العليا.

3 القياسات في البر والبحر

يُرسل البث الصادر من سطح الأرض عبر الغلاف الجوي إلى الساتل. وإذا ارتفعت قيم التوهين، تعذر الاستشعار بهذا البث. وحتى يمكن قياس حرارة الطبقات السفلى للغلاف الجوي ينبغي أن يكون التوهين ضعيفاً؛ وفي هذه الحالة، ينبغي دمج بث سطح الأرض والغلاف الجوي حتى يمكن الاستشعار عن بُعد بدرجة أدنى طبقة للغلاف الجوي. وينبغي إجراء قياسات إضافية داخل قنوات النوافذ للفصل بين نمطين من المساهمات. ويتناسب بث السطح مع الحرارة والبنية على السطح. وتتوقف هذه الخصائص على طبيعة العزل الكهربائي للأرض ومدى خشونة الأرض. وبما أن بنية السطح تكون دائماً أقل من واحد (أي إن الجسم الأسود المثالي وحده تبلغ بنيته 1، ولا يوجد سطح مادي يمثل جسماً أسود مثالياً)، تُرسل إشعاعات من السطح وتنتشر. وتصدر هذه الإشعاعات المنتشرة من بث إلى الأسفل يأتي من الغلاف الجوي فوق السطح. وعندما تكون قناة النافذة بقيم توهين ضئيلة تكون الإشعاعات غير ملحوظة؛ وفي غير ذلك من الحالات تؤخذ قيمتها في الاعتبار من أجل التوصل إلى حل.

ولا تتغير حرارة لمعان السطح حسب التردد بنفس سرعة تغير البث من خطوط الامتصاص الجوي. وبما أن تأثير خصائص السطح يتغير ببطء حسب التردد فإن تحديد قيم هذه الخصائص يتطلب إجراء عدة رصدات في نفس الوقت على مدى ترددات واسع في النوافذ الجوية. ولا يمكن التفرقة بين المعلومات المختلفة إلا في حالة اختلاف تغير هذه المعلومات حسب التردد. وإن حرارة اللمعان في سطح المحيط تتوقف على درجة الملوحة والحرارة والرياح. ويعدل هبوب الرياح حرارة اللمعان إذ تجعل السطح خشناً فيعلوه الزبد الذي تختلف خصائص العزل الكهربائي فيه عن خصائص الماء. وتقاس الملوحة على أفضل وجه عند ترددات أدنى من 3 GHz، وعندما تلزم الدقة العالية جداً في القياس يجري القياس بأدنى من 1.5 GHz. ويجري قياس حرارة سطح البحر على أفضل وجه بين 3 و 10 GHz ويكون التردد الأمثل قريب من 5 GHz. وتؤثر الرياح على الرصد في جميع الترددات، لكن أفضل القياسات تتم فوق 15 GHz.

وإن لطبقات الجليد أو النفط العائمة على سطح البحر خصائص عزل كهربائي تختلف عن خصائص الماء مما يسمح باستشعارها عن بُعد نتيجة تغير حرارة اللمعان. ويمكن أن تؤدي البقع النفطية إلى تغير حرارة اللمعان فوق 30 GHz بمقدار يزيد على 50 K ويمكن لطبقة الجليد أن تؤدي إلى تغير الحرارة بمقدار يزيد على 50 K في مدى الترددات من 1 إلى 40 GHz. ورغم أنه يمكن لطبقات الجليد أو النفط العائمة أن تفضي إلى تغير كبير في حرارة اللمعان، يجب إجراء عدد من الرصدات في كل نافذة في الغلاف الجوي لفصل آثار الجليد والنفط عن آثار الأمطار والسحب.

ويمكن كشف محتوى الرطوبة في الطبقات السطحية بترددات الموجات الصغيرة. وتتغير حرارة لمعان الثلج والتربة بتغير محتوى الرطوبة والتردد. وعموماً كلما كان التردد أدنى، كانت الطبقة التي يُستشعر بها عن بُعد أكثر سماكة. وبما أن الرطوبة على السطح مرتبطة ببيانات الرطوبة الوصفية تحت السطح فقد يكون من المفيد إجراء رصدات في ترددات أعلى. وعند استشعار الجليد الذائب عن بُعد بالقرب من السطح توفر رصدات بالتردد 37 GHz أو أعلى معظم المعلومات المطلوبة. وتكون أفضل الترددات تحت 3 GHz عند استشعار التربة عن بُعد، خاصة التربة المغطاة بطبقة نباتية. وعملياً، ينبغي إجراء الاستشعار عن بُعد بعدة ترددات بحيث يمكن تصنيف الأسطح وفقاً لدرجة خشونتها أو التغطية النباتية أو عمر طبقة الجليد البحري إلخ، هذا من ناحية، وقياس معالم مثل سمك الجليد أو محتوى الرطوبة، من ناحية أخرى.

الملحق 2

العوامل المرتبطة بتحديد عروض النطاقات المطلوبة

1 حساسية مستقبلات قياس الإشعاع

إن مستقبل قياس الإشعاع هو جهاز لقياس الإشعاعات الحرارية التي يجمعها الهوائي الخاص به والضوضاء الحرارية الناتجة عن مستقبل قياس الإشعاع. ودمج الإشارة المستقبلية يمكن خفض تغيرات الضوضاء العشوائية وإجراء تقييم دقيق لمجموع قدرات الضوضاء الحرارية للمستقبل والضوضاء الحرارية للإشعاعات الخارجية. وبتحويل قدرة الضوضاء في كل وحدة عرض النطاق إلى حرارة ضوضاء مكافئة، يمكن التعبير عن التأثير المثالي للدمج في خفض نسبة عدم التيقن من القياس وذلك بالمعادلة التالية:

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

حيث تكون:

ΔT_e : استبانة قياس الإشعاع (عدم التيقن الفعال بشأن تقدير الضوضاء الإجمالية في النظام، $T_A + T_N$)

α : ثابت نظام الاستقبال، $1 \leq \alpha$ ، حسب تصميم النظام

T_A : حرارة الهوائي

T_N : حرارة ضوضاء المستقبل

B : الاستبانة الطيفية لمقياس الإشعاع الطيفي أو عرض النطاق قناة قياس إشعاع واحدة

τ : مدة الدمج.

ويعتمد ثابت نظام الاستقبال، α ، على نوع نظام الكشف. ولجمل مقاييس قدرة الإشعاع التي تستخدمها أجهزة الاستشعار في خدمة استكشاف الأرض الساتلية، لا تقل قيمة هذا الثابت عن الواحد. وفي الممارسة العملية، يقترب هذا الثابت كثيراً من قيمة واحد في معظم مقاييس قدرة الإشعاع الحديثة.

ولا ينطبق عدم اليقين الوارد أعلاه إلا على مقياس إشعاعي مثالي تكون فيه الضوضاء عشوائية بحتة. أما الأجهزة الحقيقية فتُظهر آثاراً (مثل عدم استقرار الكسب، والضوضاء "الوردية"، وضوضاء $1/f$ ، والتقلبات الحرارية، واللاخطية، على سبيل المثال لا الحصر) تزيد القيمة النظرية ΔT_e . وتُخفّض هذه الآثار إلى أدنى حد بالاختيار المناسب لتفاصيل التصميم والتشغيل، وتُوصَف أثناء الاختبارات الأرضية، ولكن نادراً ما تُزال تماماً. ولذلك فإن القيمة ΔT_e المحسوبة من المعادلة أعلاه تمثل حداً أدنى لعدم اليقين في القياسات.

وفي عام 2025، تتيح أحدث ما توصلت إليه تكنولوجيا مضخمات الحالة الصلبة وحدات تبلغ درجة حرارة الضوضاء فيها 150 K أو أقل عبر كامل المدى الطيفي للموجات الصغيرة، مما يجعل معمارية التضخيم المباشر للترددات الراديوية والكشف المباشر الخيار التصميمي المفضل بفضل بساطتها وانخفاض احتياجاتها من القدرة والكتلة. وفوق نحو 250 GHz، لا تزال درجة حرارة الضوضاء في المضخمات المستخدمة كوحدات أمامية مرتفعة بما يكفي لأن يظل التشكيل الهتروديني التقليدي بديلاً قابلاً للتطبيق.

ومن المرجح أن تؤدي التطورات التكنولوجية إلى جعل المضخم الأمامي منخفض الضوضاء المعمارية المفضلة لجميع مقاييس الإشعاع حتى 1 000 GHz بحلول عام 2030.

وبالإضافة إلى تحسين حرارة ضوضاء المستقبل باستعمال مكبرات أولية قليلة الضوضاء يمكن أيضاً تخفيض عدم التيقن ΔT_e (أي زيادة الحساسية) في أجهزة قياس الإشعاع المحمولة بالسواتل بزيادة عرض النطاق المستعمل وباستعمال تشكيلات خاصة للمقياس تسمح بالتوصل إلى الوقت الأمثل للدمج. وحسب الاستبانة الفضائية المطلوبة يقتصر وقت دمج مقاييس الإشعاع المحمول بسواتل المدارات المنخفضة على عدة ثوان على الأكثر بسبب السرعة النسبية للسواتل.

2 خصائص أجهزة الاستشعار المنفعل عن بُعد

إن جهاز الاستشعار النمطي المستخدم لقياس العديد من المظاهر في الغلاف الجوي و سطح الأرض هو جهاز استشعار ماسح. ويمكن تحسين عرض التغطية وتضييق عرض النطاق باستخدام أجهزة استشعار مكنسة الدفع. ويمكن خفض قيم ΔT_e باستخدام أجهزة استشعار مكنسة الدفع بفضل إمكانية إطالة وقت الدمج في كل رصدة.

وتحدد متطلبات عرض النطاق لجهاز استشعار منفعل عن بُعد يقيس الغازات النزرة في الغلاف الجوي بعروض خطوط الغازات المرصودة وبفرصة رصد عدد من خطوط الغازات نفسها أو المختلفة في النافذة عينها.

ويعتمد عرض خطوط انبعاث الغازات في الغلاف الجوي على الضغط أساساً. ويملي هذا الاعتماد متطلبات الحد الأدنى من عرض النطاق والاستبانة. فعلى مستوى الأرض، تكون عروض الخطوط بواقع بضعة غيغاهرتزات. وفي طبقة الستراتوسفير، تضيق إلى ميغا هرتزات قليلة. ونظراً لاتساع عروض هذه الخطوط في المناطق الأقل ارتفاعاً، فإن أجهزة سبر حافة الغلاف الجوي الأعلى العاملة بالموجات المليمترية (أعلى من 100 GHz) تتطلب عروض نطاق واسعة جداً بواقع 10 GHz.

وقد أجريت دراسات لتحديد المتطلبات اللازمة لحساسية الاستشعار والاستبانة المكانية ووقت التكامل والاستبانة الطيفية. وترد هذه المتطلبات في التوصية ITU-R RS.2017.