الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التقرير ITU-R SM.2352-0

(2015/06)

الاتجاهات التكنولوجية للخدمات النشيطة في مدى التردد GHz 3 000-275

السلسلة SM

إدارة الطيف

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 لمدى 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.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/publ/R-REP/en)

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

ملاحظة: *وافقت لجنة الدراسات على النسخة الإنكليزية لهذا التقرير الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.*

النشر الإلكتروني
جنيف، 2016

© ITU 2016
جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التقرير ITU-R SM.2352-0

الاتجاهات التكنولوجية للخدمات النشيطة في مدى التردد 275–000 3 GHz

(2015)

مجال التطبيق

يتضمن التقرير الاتجاهات التكنولوجية للخدمات النشيطة في مدى التردد 275-00 3 GHz. ويرمي هذا التقرير إلى توفير معلومات تقنية لإعداد دراسات التقاسم والتوافق بين الخدمات النشيطة والمنفعلة، وكذلك بين الخدمات النشيطة في مدى التردد 275-00 3 GHz.

جدول المحتويات

الصفحة

1 مقدمة 3

2 السمات التيراهيرتزية، والخصائص، والتطبيقات المعتادة 3

1.2 عرض عام لنطاق التردد فوق 275 GHz 3

2.2 خصائص النطاق فوق 275 GHz 4

3.2 التطبيقات المعتادة للتيراهيرتز 5

3 معلومات تنظيمية 6

4 الاتصالات اللاسلكية التيراهيرتزية 7

1.4 حالة الاستخدام المحتمل لأنظمة الاتصالات التيراهيرتزية 7

2.4 تكنولوجيات المستقبلات التيراهيرتزية 11

5 الاستشعار والتصوير 15

1.5 أسلوب توليد التيراهيرتز 15

2.5 الكاميرات التيراهيرتزية 17

3.5 قياس الطيف 20

4.5 الاختبار غير التدميري 21

6 الأنشطة المرتبطة بالتيراهيرتز ضمن المنظمة الدولية للتوحيد القياسي 23

7 ملخص 24

8 بيبليوغرافيا 25

المختصرات والأسماء المختصرة

ATR	قياس طيف الانعكاس الكلي الموهن *(Attenuated total reflection spectrometry)*
BER	معدل الخطأ في البتات *(Bit error ratio)*
BNA	بللورات N-Benzyl-2-Methyl-4-Mitroaniline *(N-Benzyl-2-Methyl-4-Mitroaniline)*
BWO	مذبذب موجات عكسية *(Backward-wave oscillator)*
DAST	بللورات Diethylaminosulfur Trifluoride *(Diethylaminosulfur Trifluoride)*
DFG	توليد التردد التفاضلي *(Difference frequency generation)*
FEL	ليزر ذو إلكترونات حرة *(Free-electron laser)*
FTIR	مقياس طيف الأشعة تحت الحمراء لتحويل فورييه *(Fourier transform infrared spectroscopy)*
HBT	ترانزيستور ثنائي الأقطاب ومتباين أشباه الموصلات *(Heterojunction bipolar transistor)*
HEMT	ترانزيستور التنقلية العالية للإلكترونات *(High electron mobility transistor)*
IMPATT	الصمامات الثنائية للوقت الانتقالي الانهيارية وذات تأين الأثر *(Impact ionization avalanche transit-time)*
LoS	خط البصر *(Line of sight)*
LT-GaAs	أرسنيد الغاليوم المتشكل في درجة حرارة منخفضة *(Low temperature grown Gallium Arsenide)*
MMIC	الدارات المتكاملة للموجات الصغرية الأحادية *(Monolithic microwave integrated circuit)*
NEP	القدرة الضوضائية المكافئة *(Noise equivalent power)*
NFC	اتصالات المدى القريب *(Near field communication)*
NLoS	خارج خط البصر *(Non line of sight)*
QCL	ليزر شلالي كمي *(Quantum cascade laser)*
RTD	صمام ثنائي نفقي رنيني *(Resonant tunnelling diode)*
TDS	القياس الطيفي في النطاق الزمني *(Time domain spectroscopy)*
TNNNET	الوقت الانتقالي للحقن النفقي *(Tunnel injection transit-time)*
THz	تيراهيرتز *(Terahertz)*
UTC-PD	الصمام الثنائي الضوئي الحامل المرتحل الواحد *(Uni-traveling-carrier photodiode)*

المراجع

التوصية ITU-R P.676: التوهين الناجم عن الغازات الجوية

التوصية ITU-R P.838: نموذج التوهين الخاص الناتج عن المطر المعدّ للاستعمال في طرائق التنبؤ

التوصية ITU-R P.840: التوهين الناجم عن السحب والضباب

التقرير ITU-R F.2107-2: خصائص وتطبيقات الأنظمة اللاسلكية الثابتة العاملة في مديات تردد واقعة بين 57 GHz و134 GHz

1 مقدمة

إن نطاقات التردد GHz 275 ليست موزعة لخدمات معينة، ولكن لوائح الراديو (RR) تحددها للخدمة المنفعلة. وما يزال تنظيم طيف الترددات فوق GHz 3 000 قيد الدراسة وفقاً للقرار 118 (مراكش، 2002). وفي المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2012 (WRC-12) جرى تعديل الرقم **565.5** وفقاً للقرار **950 (Rev.WRC-07)** بغية التحديد لاستخدام الإدارات من أجل تطبيقات الخدمة المنفعلة، مثل خدمة علم الفلك الراديوي، وخدمة استكشاف الأرض الساتلية (منفعلة) وخدمة الأبحاث الفضائية (منفعلة). غير أن استخدام الخدمات المنفعلة للمدى GHz 1 000-275 لا يعني استبعاد استخدامه للخدمات النشيطة.

وتم عام 2013 إعداد وإقرار المسألة الجديدة ITU-R 237/1 "الخصائص التقنية والتشغيلية للخدمات النشيطة" لتشجيع الإدارات على دراسة الخصائص التقنية والتشغيلية للخدمات النشيطة في المدى GHz 1 000-275. وإلى جانب الخصائص التقنية والتشغيلية فإن من المنتظر تنفيذ دراسات تقاسم بين الخدمات النشيطة والمنفعلة، وكذلك بين الخدمات النشيطة بما يراعي تلك الخصائص وفقاً للمسألة الجديدة ITU-R 237/1.

ونظراً إلى التقدم المحرز في التكنولوجيات الأخيرة فوق GHz 275، فإن الأجهزة والدارات المتكاملة العاملة فوق GHz 275 ستتيح لنا تحقيق تطبيقات متطورة، مثل قياس الطيف، والتصوير، والاختبار غير التدميري، وكاميرا التيراهيرتز (THz) ومع أن مزايا مثل هذه الترددات العالية هي استخدام عرض نطاق فائق الاتساع لا يمكن توزيعه في نطاقات تردد الموجات الصغرية والموجات المليمترية فإن هذه المزايا غير مستغلة بعد لتطوير أنظمة لاسلكية ذات سرعة فائقة.

وبغية الاستفادة من تقدم التكنولوجيات التيراهيرتزية (THz) في تطبيقات الاتصالات الراديوية فإن من الضروري والملح فهم الاتجاهات التكنولوجية الحالية للخدمات النشيطة في النطاق فوق GHz 275.

وإلى جانب تقدم التكنولوجيات التيراهيرتزية فقد أنشأت لجنة المعايير 802 التابعة لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) فرقة المهام IEEE 802.15.3d لوضع معيار من معايير IEEE 802 يشمل أيضاً طبقة مادية (PHY) تعمل فوق GHz 275. على أنه لم يتم بعد تحديد مديات الترددات فوق GHz 275 للخدمات النشيطة، كما لم تُجر أية توزيعات على أي خدمة في هذا المدى في لوائح الراديو. ومن الملح أيضاً من الزاوية التنظيمية فهم الخصائص التقنية والتشغيلية للخدمات النشيطة لتفادي التداخل بين الخدمات المنفعلة العاملة في هذا المدى والخدمات النشيطة التي سيتم تطويرها ونشرها في المستقبل القريب.

ويقدم هذا التقرير عرضاً عاماً للاتجاه التكنولوجي للأنظمة النشيطة المدروسة في النطاق فوق GHz 275 وهو يزمع توفير معلومات تقنية لإعداد دراسات التقاسم والتوافق. والتكنولوجيات التي يتناولها البحث في هذا التقرير هي في مجالات الاتصالات اللاسلكية التيراهيرتزية، والاستشعار، والتصوير.

2 السمات التيراهيرتزية والخصائص والتطبيقات المعتادة

يستند تطوير الاتصالات اللاسلكية التيراهيرتزية إلى الاتصالات اللاسلكية التقليدية، وهو يمر عبر الموجة الصغرية والموجة المليمترية إلى الموجة التيراهيرتزية؛ وفي الوقت ذاته فإنه يبدي اهتماماً جزئياً بالاتصالات اللاسلكية الليزرية. ولن تحل الاتصالات التيراهيرتزية محل اتصالات الموجة الصغرية والليزر، غير أن للاتصالات التيراهيرتزية مزايا فريدة لا تمتلكها معظم اتصالات الموجة الصغرية والليزر.

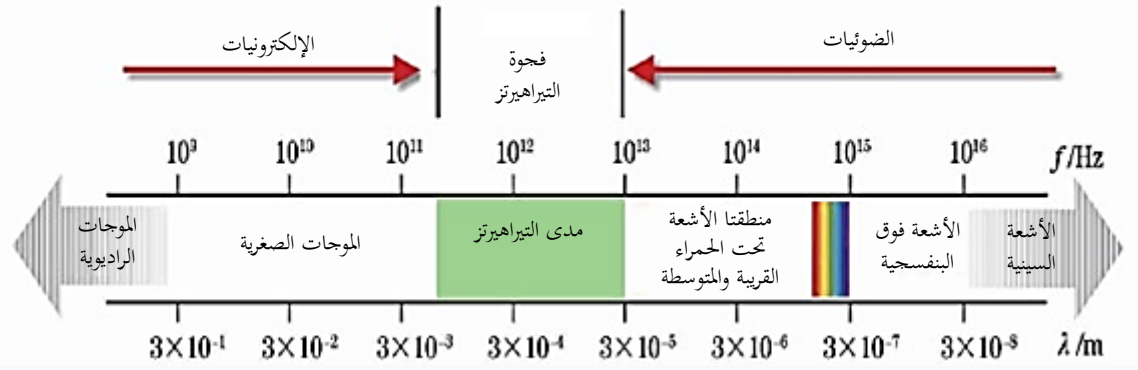
1.2 عرض عام لنطاق التردد فوق GHz 275

يشكل النطاق فوق GHz 275 الجزء الرئيسي من نطاق التيراهيرتز. وتشير الموجات التيراهيرتزية، التي يُطلق عليها أيضاً اسم الإشعاع دون المليمتري، عادة إلى نطاق التردد بين THz 10-0,1 وطول الموجة المقابل mm 3-mm 0,03.

ويعرض الشكل 1 موقع نطاق التيراهيرتز في الطيف الكهرمغنطيسي.

الشكل 1

موقع نطاق التيراهيرتز في الطيف الراديوي



2.2 خصائص النطاق فوق GHz 275

بسبب صفاته الفريدة فإن للنطاق فوق GHz 275 العديد من الخصائص الخاصة بالمقارنة مع نطاقات التردد الراديوي الأخرى. وهذه الخصائص الفريدة هي على النحو التالي:

(1) السماحية العالية

تتمتع الإشارة الراديوية فوق GHz 275 باختراق جيد في العديد من المواد العازلة والسوائل غير القطبية، ولذا فهي قادرة على تصوير المواد أو الأشياء المعتمة كما يمكن استخدامها في الاختبار غير التدميري عند معاينة السلامة أو مراقبة الجودة.

وفضلاً عن ذلك فإن أطوال موجاتها أطول من دقائق الغبار أو التراب المعلقة في الهواء، وثمة فقد ضئيل جداً فحسب للإرسال في الغبار أو الدخان، ولهذا يمكن استعمالها في التصوير في البيئة الدخانية مثل ميدان الإنقاذ من الحرائق، والبيئة الغبارية الريحية مثل الصحراء.

(2) التوهين السريع في الماء

تتسم الإشارة الراديوية فوق GHz 275 بتوهين شديد في الماء، وهو ما يمكن أن يُستخدم في الحقل الطبي. وبما أن المحتوى المائي لأنسجة الأورام يختلف اختلافاً شديداً عن خلايا الأنسجة الطبيعية، فإن بالمستطاع تحديد مواقع الأنسجة السرطانية عبر تحليل المحتوى المائي للأنسجة.

(3) السلامة

تبلغ الطاقة الفوتونية للتيراهيرتز أقل من ميني إلكترون فولط، وهو أدنى كثيراً من طاقة معظم الروابط الكيميائية. ولهذا فإن التيراهيرتز لن تتسبب في تفاعل تأين، كما أنها تتسم بأهمية حاسمة في الكشف عن العينات البيولوجية وفحوص الجسم البشري. وفضلاً عن ذلك فإن للماء تأثير امتصاصي قوي على هذا النطاق. وبما أن الإشارة الراديوية لا تستطيع أن تخترق الجلد البشري وأنها آمنة للناس، فإن بالمستطاع استخدامها في الكشف الطبي مثل الكشف عن الأمراض الجلدية.

(4) الاستبانة الطيفية

يحتوي نطاق التيراهيرتز على معلومات طيفية وافرة بما في ذلك المعلومات الفيزيائية والكيميائية. وللعديد من الجزيئات، ولاسيما الجزيئات العضوية، خصائص قوية للتشتت والامتصاص في هذا النطاق. وعبر دراسة الخصائص الطيفية للمادة في النطاق المذكور يمكن لنا فهم الخصائص الهيكلية لها، وتحديد تركيبها، وتحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية.

(5) الاستبانة المكانية العالية

يتمتع النطاق فوق GHz 275 باستبانة مكانية أفضل نسبياً من نطاق الموجة الصغرية. ومن الناحية النظرية، وبسبب طول الموجة الأقصر، فإن استبانة تصوير هذا النطاق أعلى من استبانة الموجة الصغرية.

(6) قصر طول الموجة والاتجاهية الجيدة

بالمقارنة مع الموجة الصغرية فإن التردد أعلى وهو ما يمكن أن يُستخدم كحامل اتصالات لنقل قدر أكبر من المعلومات في وحدة من الزمن. وبفضل قصر طول الموجة والاتجاهية الجيدة فإن النطاق واعد جداً للاستعمال في بعض سيناريوهات تطبيقات الاتصالات اللاسلكية.

3.2 التطبيقات المعتادة للتيراهيرتز

مع تزايد البحوث المتعلقة بموجة التيراهيرتز فإن خصائصها المرموقة تتضح أكثر فأكثر. وفي الوقت الراهن فإن الموجة ما تزال تُستخدم أساساً للمراقبة الفلكية، ولكن مع قدوم مصادر إشعاع تيراهيرتزية عالية القدرة فإن النطاق فوق 275 GHz يظهر آفاقاً واسعة ممكنة في المزيد من التطبيقات. والتطبيقات المعتادة الممكنة هي على النحو التالي:

(1) التطبيق في علم الفلك

يحتوي الإشعاع السماوي والقائم بين النجوم معلومات طيفية وافرة، والكثير منها في النطاق فوق 275 GHz مع قدر أقل كثيراً من الضوضاء الخلفية. ولهذا جاءت أنشطة البحث والتطوير بشأن النطاق المذكور من علم الفلك منذ البدايات الأولى. وإلى جانب تلسكوب الأشعة تحت الحمراء، وتلسكوب هابل الفضائي، فقد تم اختراع التلسكوب الراديوي التيراهيرتزي لدراسة الحالة الفيزيائية المعقدة للسحاب ما بين النجوم في المجرة، بما في ذلك أضخم تلسكوب لمنطقة الأشعة تحت الحمراء البعيدة في العالم.

(2) التطبيق في كشف الجزيئات

ثمة حركة لكل المواد، ورغم أن الأشياء تبدو ساكنة فإن لتركيبها الجزيئي الداخلي حركة سريعة، وطالما هناك حركة فهناك إشعاع. ويمتلك الإشعاع الكهرمغنطيسي تردده المتذبذب الخاص أو طول موجته الذي يُطلق عليه اسم "طيف البصمة". ومعظم "بصمات" الجزيئات هي في نطاق الأشعة تحت الحمراء والنطاق فوق 275 GHz، ويمكن استخدام ليزر أشباه الموصلات التيراهيرتزي لكشف الإشعاع الذي تُسببه ذبذبات الجزيئات الصغيرة التي يتعذر على الأشعة تحت الحمراء كشفها.

(3) التطبيق في التفتيش الأمني

بما أن الغالبية العظمى من المستويات الدورانية الجزيئية للمتفجرات، والمخدرات، هي في المنطقة التيراهيرتزية فإن بمقدور القياس الطيفي لنطاق التيراهيرتز أن يجري عمليات تفتيش مأمونة للجسم البشري بحثاً عن المتفجرات، والمخدرات، والجزيئات الضخمة البيولوجية، والأسلحة، والبضائع المحظورة الأخرى. وعلى خلاف التكنولوجيا القائمة للأشعة السينية والتصوير بالموجات فوق الصوتية، فإن بمقدور القياس الطيفي والتصوير لا توفير شكل الشيء فحسب، بل ومقارنة المعلومات الطيفية المقيسة مع المكتبة القائمة للطيف التيراهيرتزي الخطر لتحديد خصائص المادة. وإلى جانب ذلك، ومع الطاقة المنخفضة للغاية، فإن الموجة لن تُنتج تأيناً ضاراً بالأنسجة البيولوجية. ولذلك، ومقارنة مع أوجه قصور الأشعة السينية التي يمكن أن تلحق الأذى بالجسم البشري ويتعذر على كواشفها المعدنية الكشف عن المواد غير المعدنية، فإن للتكنولوجيا التيراهيرتزية آفاق تطبيق جيدة في التفتيش الأمني.

(4) التطبيق في الطب البيولوجي

يمكن للجزيئات القطبية مثل الماء أو الأوكسجين أن تمتص بسهولة الأشعة الراديوية فوق 275 GHz، وللجزيئات المختلفة طيف امتصاص متباين. وعبر استخدام هذه الخطوط الطيفية وتكنولوجيا التصوير فإن بالإمكان إجراء تشخيص للآفات المبكرة الناجمة عن سرطان الجلد والأنسجة السطحية الأخرى. وفي العمليات الجراحية فإن نظام التصوير التيراهيرتزي يُستخدم في الغالب للكشف عن استئصال السرطان في الوقت الفعلي، ويمكن لهذه الطريقة أن تنتج صوراً للأنسجة الناعمة أشد وضوحاً من التصوير فائق الصوت. وفضلاً عن ذلك فإن بمقدورنا استخدام نظام القياس الطيفي التيراهيرتيزي في النطاق الزمني (THz-TDS) لدراسة الجزيئات الضخمة البيولوجية التي يقع مستوى طاقة الذبذبة الجزيئية أو المستويات الدورانية فيها في منطقة التيراهيرتز، ثم توفير الإرشاد لإنتاج العقاقير والبحوث الطبية.

(5) التطبيق في ميدان الاتصالات اللاسلكية

يقع النطاق فوق GHz 275 في الموقع الانتقالي من البصريات إلى الإلكترونيات، ويتمتع على حد سواء بخصائص اتصالات الموجة الصغرية والموجة الضوئية إلى جانب طبيعته الذاتية. وقبل كل شيء، ومع التطور السريع في الاتصالات، فإن الاتصالات التقليدية للموجة الصغرية تواجه صعوبة في تلبية متطلبات الاتصالات اللاسلكية عريضة النطاق ذات السرعة العالية، في حين أنه بسبب المعدل العالي لإرسال البيانات وعرض نطاق الطيف الواسع، فإن هذا النطاق يمكن أن يغدو قوة محتملة للاتصالات اللاسلكية المستقبلية. ومن جهة أخرى فإن للموجة الضوئية توهين إرسال ضخم في الغبار، والجدران، والمواد البلاستيكية، والملابس، والمواد الأخرى غير المعدنية أو المواد غير القطبية. وبمقدور النطاق فوق GHz 275 أن يخترق هذه المواد بتوهين منخفض، مما يجعله قادراً على الاختراق بشكل جيد في بيئة قاسية. على أن لهذا النطاق نقائصه أيضاً، وأشد هذه النقائص فتكاً أن باستطاعة الجزيئات القطبية امتصاصه بسهولة في الغلاف الجوي، ولذلك فإن توهينه في هذا الغلاف قوي نسبياً، ولا سيما في الأيام المطيرة. وقررت هذه الخصائص أن بالإمكان أساساً استخدام النطاق المذكور في الاتصالات الكوكبية المستقبلية، والاتصالات المتنقلة الأرضية ذات النطاق العريض والمدى القصير، وفي البيئات القاسية مثل المناخات الجافة أو العابقة بالدخان أو في أرض المعركة.

(6) التطبيق في الرادار

تتمتع تطبيقات الموجة التيراهيرتزية في ميادين الرادار، والتعرف على الأهداف، والشُعيلات والموجهات الدقيقة، بآفاق محتملة. وبالاستفادة من مزايا الموجة التيراهيرتزية مثل التوجيهية الجيدة وتركيز الطاقة فإن بإمكاننا أن نصنع رادارات عالية الاستبانة ورادارات تتبع ذات زاوية ارتفاع منخفضة. وبفضل التصوير عبر المواد فإن بمقدورنا كشف الأشياء المخبأة تحت الأغطية أو في الدخان. وبالاستناد إلى ميزة اختراق الغبار والدخان فإنه يمكن إنتاج نظام ملاحي لكافة الأجواء، ويغدو عندها بالإمكان توجيه الطائرات عند هبوطها في الضباب. وتُعتبر موجة التيراهيرتز ذات نطاق عريض بالمقارنة مع نطاقات الموجات الأخرى، وهكذا فإن لها مدى ترددات أوسع بالمقارنة مع نطاق التكنولوجيا الخفية المستخدمة هذه الأيام، بحيث يمكن للرادار ذي النطاق فائق العرض الذي يستخدم الموجة التيراهيرتزية كمصدر للإشعاع أن يلتقط صورة الطائرات الخفية.

3 معلومات تنظيمية

تم تعديل الرقم **565.5** من لوائح الراديو للتحديد للاستخدام من جانب الإدارات لتطبيقات الخدمات المنفعلة مثل خدمة الفلك الراديوي، وخدمة استكشاف الأرض الساتلية (المنفعلة)، وخدمة الأبحاث الفضائية (المنفعلة) في مؤتمر WRC-12. ويُعرض أدناه الرقم **565.5** من لوائح الراديو (طبعة عام 2012):

GHz 3 000-275

التوزيع على الخدمات		
الإقليم 1	**الإقليم 2**	**الإقليم 3**
3 000-275	565.5 (غير موزع)	

565.5 تحدد نطاقات التردد التالية في المدى GHz 1 000-275 لاستعمال الإدارات لأغراض تطبيقات الخدمات المنفعلة:

– خدمة الفلك الراديوي: GHz 323-275 وGHz 371-327 وGHz 424-388 وGHz 442-426 وGHz 510-453 وGHz 711-623 وGHz 909-795 وGHz 945-926؛

– خدمة استكشاف الأرض الساتلية (المنفعلة) وخدمة الأبحاث الفضائية (المنفعلة): GHz 286-275 وGHz 306-296 وGHz 356-313 وGHz 365-361 وGHz 392-369 وGHz 399-397 وGHz 411-409 وGHz 434-416 وGHz 467-439 وGHz 502-477 وGHz 527-523 وGHz 581-538 وGHz 630-611 وGHz 654-634 وGHz 692-657 وGHz 718-713 وGHz 733-729 وGHz 754-750 وGHz 776-771 وGHz 846-823 وGHz 854-850 وGHz 862-857 وGHz 882-866 وGHz 928-905 وGHz 956-951 وGHz 973-968 وGHz 990-985.

ولا يحول استعمال المدى 275-000 1 GHz من جانب الخدمات المنفعلة دون استعمال هذا المدى من جانب الخدمات النشيطة. وتحث الإدارات التي ترغب في إتاحة الترددات في المدى 275-000 1 GHz لأغراض تطبيقات الخدمات النشيطة على اتخاذ كل التدابير الممكنة عملياً لحماية هذه الخدمات المنفعلة من التداخلات الضارة، إلى حين وضع جدول توزيعات نطاقات التردد في المدى الترددي 275-000 1 GHz المذكور أعلاه.

ويجوز للخدمات النشيطة والمنفعلة على السواء أن تستخدم جميع الترددات في المدى 000 1-000 3 GHz. (WRC-12)

4 الاتصالات اللاسلكية التيراهيرتزية

هناك عدد من أنشطة البحوث على أنظمة الاتصالات اللاسلكية ذات النطاق العريض الفائق في نطاق التردد فوق 275 GHz. وترمي بعض البحوث إلى التوصل إلى أنظمة اتصالات لاسلكية فائقة السرعة ذات سطوح بينية مع الإثرنت ذات معدل إرسال يبلغ 40-Gbit/s و100-Gbit/s.

ونتيجة مقدرة الإرسال العالي القدرة وفقد الانتشار الواسع لوصلات الاتصالات التي تستخدم تكنولوجيات التيراهيرتز فإن بمقدور هذه الوصلات أن تعمل بوصفها وصلات نفاذ الميل الأخير. وقد قامت منظمات البحث والتطوير بعرض العديد من الاختبارات باستخدام تردد فوق 275 GHz.

1.4 حالة الاستخدام المحتمل لأنظمة الاتصالات التيراهيرتزية

عند دراسة حالات استخدام الاتصالات التيراهيرتزية فإنه ينبغي النظر في النقاط المحددة التالية:

- استخدم عرض نطاق التردد فائق العرض.
- احتمال تصاغر الهوائي والجهاز.
- الاتجاهية العالية والفقد الواسع للانتشار في الفضاء الحر (طول الموجة أقل من 5/1 من نطاق 60 GHz، ومع أن فقد الانتشار في الفضاء الحر يعادل 25 مرة أو أكثر، فإنه يعوَّض بخصائص هوائي الكسب العالي).
- تطوير تكنولوجيا تصنيع مثل ما يتعلق بالمذبذبات، ومضخمات القدرة، وهوائيات توجيه الحزمة.

1.1.4 اتصالات الجوار الفائق بين الرقاقات ولوحات الدارات

يعرض الشكل 1 حالة استخدام اتصالات الجوار الفائق بين الرقاقات ولوحات الدارات. ومن المنتظر أن يؤدي الوصل اللاسلكي للأجزاء ولوحات الدارات إلى إلغاء الأسلاك ومصاغرة الطبقات التحتية والأجهزة.

ويبين الجدول 1 المتطلبات المعتادة لحالة الاستخدام هذه. وتُلخص هذه المتطلبات بأن مسافات الاتصالات عند تنفيذ الدارات المتكاملة و/أو ترقيد الطبقات التحتية للدارات المتكاملة المنفذة في الغلاف ذاته ستتراوح بين بضعة مليمترات وبضعة عشرات من السنتيمترات.

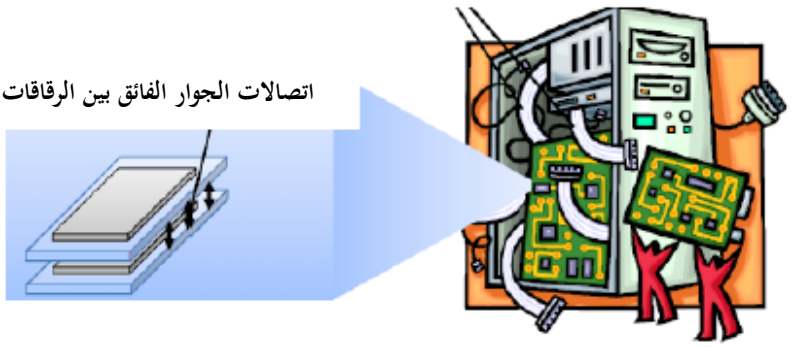
وفيما يتعلق بسرعة الإرسال فقد حُددت سرعة قدرها 10 Gbit/s من أجل المنفذ التسلسلي العام USB3.1، أما بالنسبة للمنفذ PCIExpress 4.0 فقد تم تنميط سرعة نقل لطبقة وصلات البيانات عند 4 GB/s = 32 Gbit/s (ثنائية الاتجاه)، وبالإضافة إلى ذلك فقد جرى تحديد ما يصل إلى 4 GB/s × 64 = 256 GB/s (2 Tbps) وهو ما يصل في مجموعه إلى 64 ممراً.

وفي حين أن من غير الضروري على الدوام مساندة اتصالات تتجاوز التيرابت في الثانية فإنه مع الاتصالات بين الرقاقات وبين لوائح الدارات التي تستخدم الاتصالات التيراهيرتزية فإن الأمر سيتطلب إرسال بسرعة فائقة تتجاوز على الأقل بضعة عشرات من الجيغابت/ثانية.

وفيما يتصل ببيئة الانتشار فإن من الضروري دراسة اتصالات خط البصر وخارج خط البصر كنموذج جوار أو جوار فائق في الأغلفة والذي يفترض غلافاً معدنياً مترافقاً مع موجات عاكسة قوية. ومن الضروري النظر في تأثير المسيرات المتعددة بين الأجهزة المرتبة في الجوار الفائق، والمسيرات المتعددة عبر الجدران الداخلية لغلاف الجهاز من خلال اختراق الموجات التيراهيرتزية للطبقات التحتية.

الشكل 2

استخدام اتصالات الجوار الفائق بين الرقاقات ولوحات الدارات



الجدول 1

المتطلبات المعتادة

مسافة الاتصالات	بضعة مليمترات إلى بضعة سنتيمترات (جوار فائق إلى جوار)
سرعة البيانات	بضعة عشرات من الجيغابت/ثانية
بيئة الانتشار	جوار فائق في الغلاف ونموذج الجوار (خط البصر/خارج خط البصر)
معدل الخطأ المطلوب في البتات	10^{-9}

2.1.4 مزامنة المحتويات مع السحاب عبر اتصالات المدى القريب

يعرض الشكل 3 حالة استخدام لمزامنة المحتويات مع السحاب عبر اتصالات المدى القريب. وقد شهدت الخدمات التي تستخدم السحاب مؤخراً زيادة سريعة، إلى جانب خدمات التنسيق بين الهواتف الذكية المتزايدة بسرعة والسحاب.

وتندرج خدمة التخزين السحابي ضمن الخدمات السحابية التي تتولى تخزين الصور واللقطات الفيديوية على هاتف المستخدم عبر شبكة دون أن يكون المستخدم واعياً بعملية المزامنة هذه. على أن الاتصالات الرزمية المستخدِمة لأنظمة الجيل الثالث والتطور طويل الأمد التي تستعملها الهواتف الذكية في المزامنة المتكررة للمحتويات في السحاب دون وعي المستخدم بذلك، تؤدي إلى زيادات غير منتظرة في استهلاك البطاريات.

وتفترض حالة الاستخدام هذه أنه بالإضافة إلى وظيفة شحن الدارات المتكاملة عند بوابات البطاقات المؤتمتة في محطات القطارات فإن بمقدور المستخدمين امتلاك أجهزة ذكية مجهزة بوظيفة الاتصالات التيراهيرتزية. وعند عبورك بوابة بطاقات في محطة للقطارات في طريقك إلى المكتب أو المدرسة فإن مزامنة المحتويات في الوقت نفسه من خلال الاتصالات التيراهيرتزية سيؤدي إلى كبح استهلاك البطاريات.

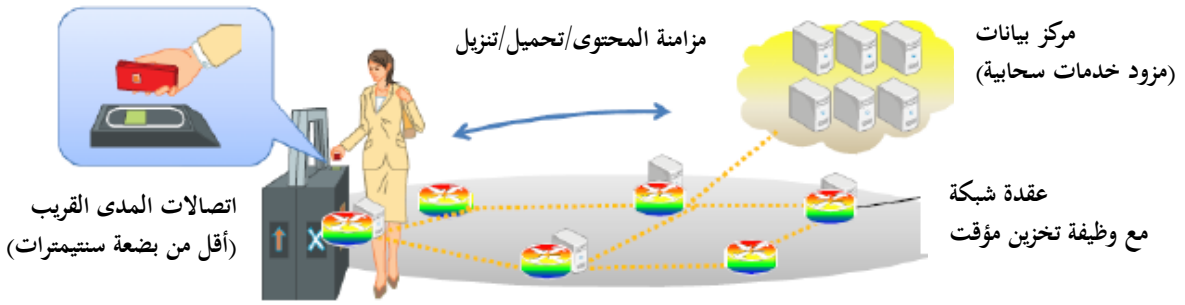
ويوضح الجدول 2 المتطلبات المعتادة لحالات الاستخدام هذه. ومع أن مسافة الاتصالات أقل من بضعة سنتيمترات فإنه لمزامنة حجم بيانات أو محتوى فعال خلال برهة وجيزة تقل عن ثانية واحدة فإن من المجدي جعل سرعة الاتصالات أسرع ما يمكن. ولهذه الغاية، وبالإضافة إلى سرعة الاتصالات، فإن من الضروري أيضاً تطوير نظام للاستيقان والانتساب يتيح أن يكون الوقت اللازم لإرساء وصلة

الاتصالات قصيراً جدا. ومن جهة أخرى، وحتى لو كان بالمستطاع أن تتجاوز سرعة اتصالات المدى القريب التيراهيرتزية 100 Gbit/s فإن من الضروري التحقق مما إذا كانت سرعة قراءة وكتابة التخزين، التي يُفترض أن تكون الهواتف الذكية المستعملة في حالات الاستخدام هذه مجهزة بها، تتوافق مع مثل هذا الإرسال عالي السرعة. وكمثال واحد على ذلك فإن سرعة قراءة وكتابة أقراص الحالة الصلبة (SSD) التي يُقال إنها الأسرع في العالم حالياً هي نحو 500 Mbytes/s (4 Gbit/s).

كما أن من المفترض أن بيئة الانتشار ستكون نموذج جوار بين الأجهزة وهو ما ينطبق فقط على خط البصر. وتدعو الحاجة إلى دراسة ما إذا كانت الانعكاسات متعددة المسيرات بين الأجهزة في الجوار ستؤثر على نقل البيانات.

الشكل 3

حالة استخدام مزامنة المحتوى مع السحاب من خلال اتصالات المدى القريب



الجدول 2

المتطلبات المعتادة

مسافة الاتصالات	ما يصل إلى بضعة سنتيمترات (جوار)
سرعة البيانات	4 Gbit/s – بضعة عشرات الجيغابتات/ثانية
بيئة الانتشار	نموذج الجوار بين الأجهزة (خط البصر)
معدل الخطأ المطلوب في البتات	10^{-12}

3.1.4 الاتصالات اللاسلكية بين المخدِّمات داخل مركز للبيانات

يعرض الشكل 4 حالة استخدام الاتصالات التيراهيرتزية بين المخدِّمات داخل مركز للبيانات. وقد شهدت الفترة الأخيرة تزايداً سريعاً في الخدمات التي تستخدم السحاب مما أدى إلى التعجيل بوتيرة بناء مراكز البيانات. وبصفة عامة يمكن العثور على العديد من رفوف المخدِّمات المجهزة بمخدِّمات مختلفة بما في ذلك التخزين والمبدلات المتعددة في مراكز البيانات، ومن المحبذ جعل الأسلاك بين المخدِّمات ضمن رفوف الخدمات والربط بين الرفوف غير سلكي.

ويوضح الجدول 3 المتطلبات المعتادة لحالة الاستخدام هذه. وتتراوح مسافات الاتصالات بين بضعة سنتيمترات، بافتراض ترتيب التوصيل بين المخدِّمات عمودياً ضمن رفوف المخدِّمات، وبضعة أمتار بافتراض التوصيل بين الرفوف.

وفيما يتصل ببيئة الانتشار فإن من الضروري النظر في كل من خط البصر وخارج خط البصر وهو ما يفترض نموذجاً مكتبياً تُستخدم فيه مواد بناء ذات نفاذية منخفضة نسبية (انعكاسية عالية)، ولكن إذا تصورنا حالة خاصة يُستعاض فيها عن رف المخدم الموضوع بالقرب من سطح الجدار والتوصيلات الكبلية بين الألواح بوصلة اتصالات تيراهيرتزية فإنه يمكن تطبيق نموذج ذي شعاعين بين الألواح الخلفية.

الشكل 4

الاتصالات اللاسلكية بين المخدِّمات داخل مركز للبيانات

الجدول 3

المتطلبات المعتادة

مسافة الاتصالات	بضعة سنتيمترات– بضعة أمتار (جوار)
سرعة البيانات	بضعة عشرات الجيغابتات/ثانية – بضعة مئات الجيغابتات
بيئة الانتشار	نموذج مكتبي/نموذج الموجتين (خط البصر/خارج خط البصر)
معدل الخطأ المطلوب في البتات	10^{-12}

4.1.4 التوصيل اللاسلكي المباشر/غير المباشر

إن الوصلة المباشرة هي توصيلة بين محطة قاعدة وعنصر شبكة أشد مركزية، أما الوصلة غير المباشرة فهي وصلة بين مراقب المعدات الراديوية لمحطة قاعدة ورأس راديوي بعيد (وحدة الراديو). وقد تؤدي المزيد من التطورات مثل النشر الواسع للخلايا الصغيرة، وتنفيذ الإرسال التعاوني متعدد النقاط (CoMP) و/أو شبكات النفاذ الراديوي السحابي (C-RAN) إلى زيادة معدلات البيانات المطلوبة للتوصيل غير المباشر أو التوصيل المباشر أو لكليهما. وينبغي الإدراك بأن هذه الوصلات التي تستخدم وصلات لاسلكية قد تكون جذابة في الحالات التي لا تتوافر فيها وصلات ليفية.

وفي بعض الحالات التي تدعو فيها الحاجة إلى عدة عشرات من الجيغابتات فإن نطاق التردد التيراهيرتزي قد يبدو حلاً جذابا. وفي البيان العملي الموصوف في المرجع 1 فقد تم تحقيق معدل بيانات قدره 24 Gbit/s على امتداد مسافة وصلة قدرها 1 km.

الجدول 4

المتطلبات المعتادة

مسافة الاتصالات	500 m إلى 1 km
سرعة البيانات	ما يصل إلى 100 Gbit/s
بيئة الانتشار	خارج المباني
معدل الخطأ المطلوب في البتات	غير متوافر

5.1.4 الشبكة المحلية اللاسلكية التيراهيرتزية (THz WLAN)

يعرض الشكل 5 حالة شبكة محلية لاسلكية تيراهيرتزية (WLAN). ومع تطور تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية فإن الشبكات المحلية اللاسلكية تضطلع بدور أشد أهمية في الحياة البشرية، فهي تحرر الناس من قيود الأسلاك. وفي الوقت الحاضر، وعلى غرار الإنترنت

وشبكات الاتصالات المتنقلة، فإن الشبكات المحلية اللاسلكية قد أضحت وسيلة هامة لإرسال المعلومات وهي مستخدمة على نطاق واسع في المطارات، والمكاتب، والمطاعم، والمنازل، وما إليها. والقيمة الأسية لتردد التيراهيرتز هي 1-4 وهو ما يزيد عن الموجة الصغرية، ويمكن لمعدل بياناته أن يبلغ 10 Gbit/s. وبالنظر إلى خصائص السرعة العالية، والنطاق العريض، والهيكل المدمج، والحجم الصغير، وانخفاض الضرر الإشعاعي، ومقاومة الشبكات المحلية اللاسلكية التيراهيرتزية الشديدة للتداخل، فإن بالمستطاع استخدامها في تطبيقات مدنية وعسكرية، مثل الهواتف الفيديوية عالية الجودة، والمؤتمرات الفيديوية، والألعاب الثلاثية الأبعاد الحقيقية، وما إلى ذلك.

الشكل 5

حالة استخدام شبكة محلية لاسلكية تيراهيرتزية

الجدول 5

المتطلبات المعتادة

مسافة الاتصالات	بضعة عشرات من الأمتار
سرعة البيانات	بضعة ميغابتات/ثانية إلى بضع عشرات من الميغابتات/ثانية
بيئة الانتشار	مكاتب، مطارات، مطاعم
معدل الخطأ المطلوب في البتات	$\leq 1\times10^{-6}$

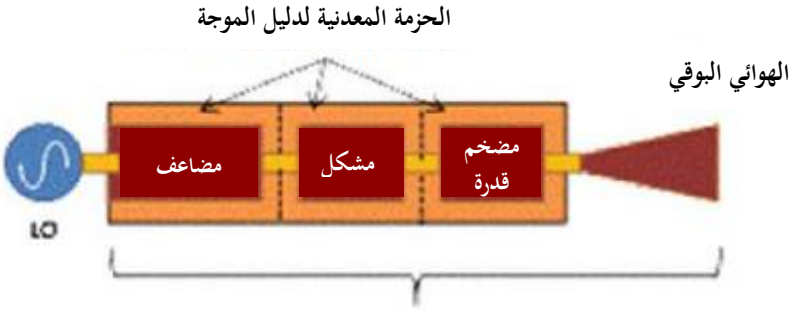
2.4 تكنولوجيات المستقبلات التيراهيرتزية

1.2.4 مستقبل 300 GHz يستخدم الدارات المتكاملة للموجات الصغرية الأحادية (MMIC)

يعرض الشكل 6 مخططاً إجمالياً للهيكل العام لوحدة مرسل. وقد تم تركيب هوائي بوقي قطري، ومضخم قدرة، ومشكِّل، ومضاعف في حزمة معدنية لدليل الموجة. ويقوم المضاعف بمضاعفة ناقل 75 GHz المتولد عن المذبذب المحلي ويتم تزويد المشكل بإشارات 20 GHz. ولتقييم وحدة الإرسال يتم تشكيل نظام تقييم بتركيب وحدة مرسل للقيام بالتقييم. وتتألف وحدة المرسل من هوائي بوقي معياري (24 dBi) ووحدة دليل موجة مجهزة بصمام ثنائي حاجز Schottky. ويبين الشكل 7 طيفاً مقيساً لإشارة التشكيل ASK بسرعة 20 Gbit/s (300 GHz) عند مطراف خرج مضخم القدرة. ولوحظت إشارة تشكيل عند تردد مركزي قدره 300 GHz+/-20 GHz من طيف خرج المشكّل، على النحو المعروض في الشكل 8.

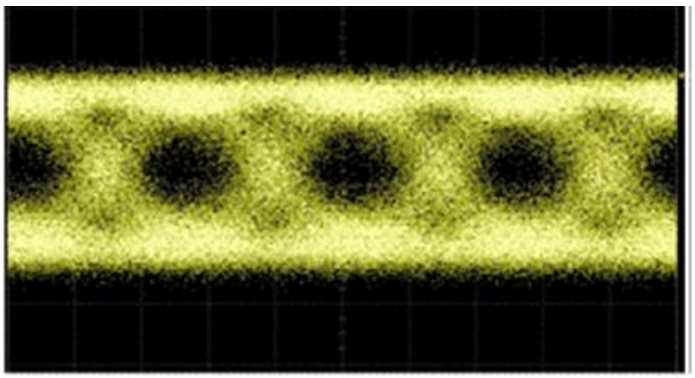
الشكل 6

مخطط إجمالي لوحدة المرسل



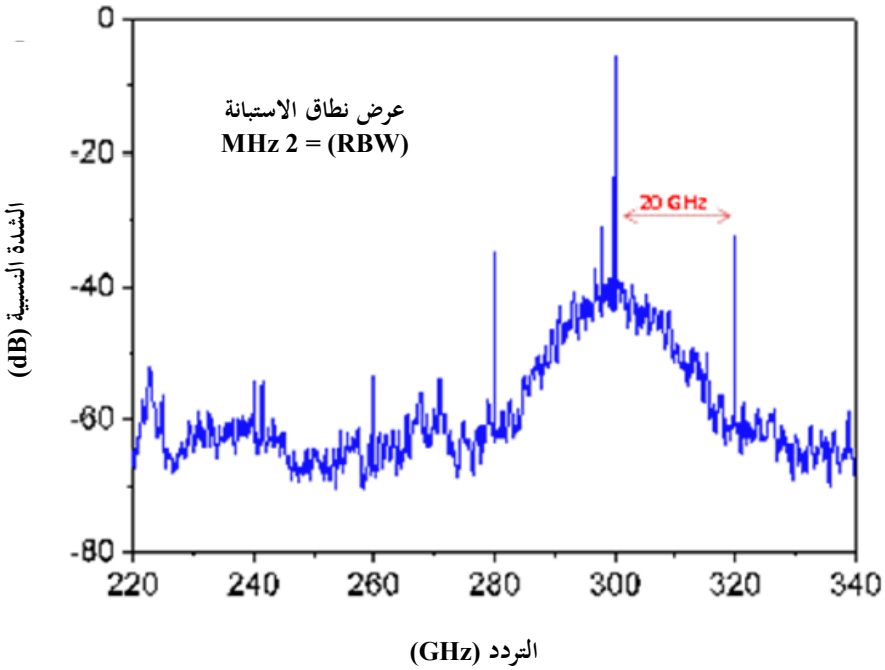
الشكل 7

مخطط عين لإشارة 20 Gbit/s لوحدة المرسل



الشكل 8

طيف خرج مضاعف القدرة



ويطرح المرجع 1 نهجاً آخر باستخدام تقنية MMIC حيث يُعرض مرسل اتساع رباعي ذي توافقية فرعية يعمل في النطاق GHz 240. كما أن خصائص المرسل مدرجة في المرجع 1. ومع أن التردد الحامل مع هذا الحل يقل عن GHz 275 فإن المعلومات تعطي بعض التلميحات عن خصائص المرسل المستجيب الذي يمكن توقع أن يكون في المدى الأدنى لتردد التيراهيرتز.

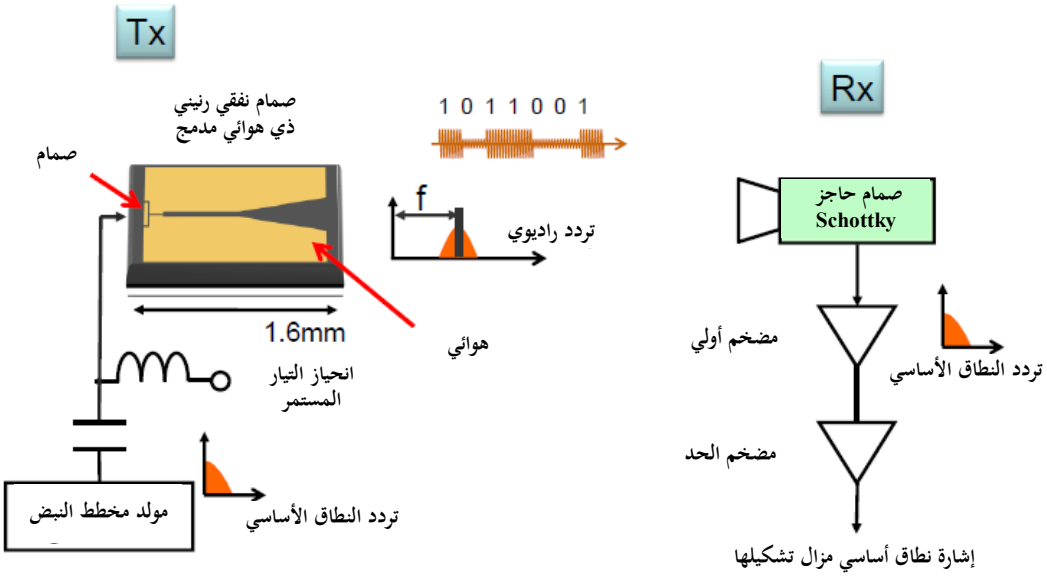
ويعرض المرجع 2 نظام اتصالات لاسلكي يعمل في النطاق GHz 237,5 وقادر على توفير معدل بيانات قدره Gbit/s 100 على امتداد مسافة تبلغ m 20. وفي حين أنه على جانب المستقبل فإن التكنولوجيا ذاتها تُستخدم على النحو الموصوف في المرجع 1 يتم تطبيق نهج ضوئي على المرسل باستعمال صمام ثنائي ضوئي حامل مرتحل واحد والذي يتم بعد ذلك بث الخرج منه باستخدام هوائي مركز للحزمة.

2.2.4 مرسل مستقبل GHz 300 يستخدم صمام ثنائي نفقي رنيني (RTD)

إن المذبذب هو ما يُطلق عليه اسم الصمام الثنائي النفقي الرنيني (RTD) الذي يتذبذب بفولطية انحياز مناسبة للتيار المستمر. وعبر تغيير فولطية الانحياز يتم تشكيل الإشارة الناقلة GHz 300 على أنها تشغيل وإيقاف رهناً باتساع فولطية الانحياز. وبالنسبة للمستقبل يُستخدم مستقبل كشف مباشر على النحو المعروض في الشكل 9. وكان معدل البتات الأقصى هو Gbit/s 1,5 وحلت تكنولوجيات الصمامات الثنائية محل إرسال إشارات التلفزيون عالي الوضوح غير المضغوطة. وقد جرت البرهنة أيضاً على أن بالمستطاع تشغيل الصمام النفقي الرنيني ككاشف ذي حساسية عالية. وتمت البرهنة كذلك على إرسال خال من الأخطاء بسرعة Gbit/s 2,5 عند GHz 625 باستخدام مضاعف تردد للمرسل.

الشكل 9

مخطط إجمالي لوصلة لاسلكية باستخدام تكنولوجيات الصمامات الثنائية

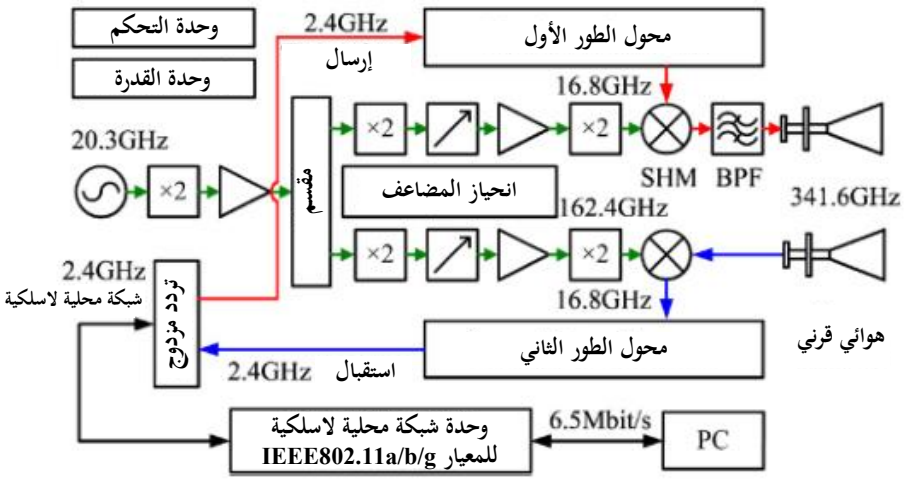


3.2.4 الشبكة المحلية اللاسلكية THz-0,34 المستندة إلى المعيار IEEE802.11

يعرض الشكل 10 مخطط الشبكة المحلية اللاسلكية THz-0,34 المنفذة بطرق مرسل مستقبل للاتصالات اللاسلكية THz-0,34 المستندة إلى تكنولوجيا إلكترونيات أشباه موصلات الحالة الصلبة وعلى جهاز شبكة محلية لاسلكية يرتكز إلى المعيار IEEE802.11. ويمكن أن تصل بيانات سرعة الشبكة المحلية اللاسلكية THz-0,34 إلى Mbit/s 6,536 على مدى m 50 ويقل فيها معدل الخطأ في البتات عن 10^{-6}. وترسى طبقة التحكم بنفاذ الوسيط والطبقة المادية الجزئية عبر وحدة لاسلكية تجارية للمعيار IEEE802.11 تعمل عند GHz 4,2 بسرعة Mbit/s 150. ويمكن تحريك الحامل GHz 2,4 إلى GHz 16,8 باستخدام مازج. ويتم تلقي إشارة الحامل GHz 16,8 من جانب طرف المرسل المستقبل للشبكة المحلية اللاسلكية THz-0,34 وتحرك إلى THz 0,34، ثم يُطلق الهوائي إشارة THz 0,34. وإذا ما تلقى طرف المرسل المستقبل لـ THz 0,34 إشارة فإنه يحولها إلى إشارة أدنى تبلغ GHz 2,4 ويرسلها إلى جهاز لاسلكي بالاستناد إلى المعيار IEEE802.11.

الشكل 10

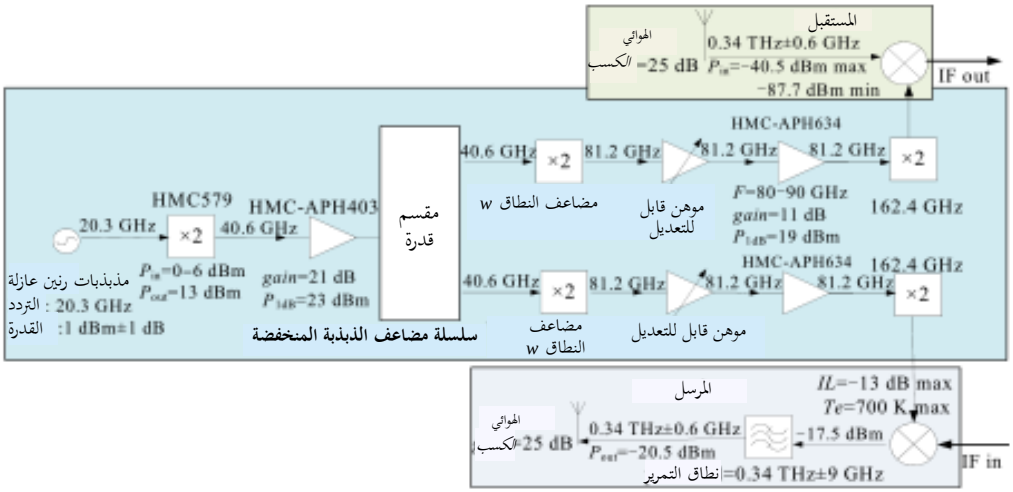
مخطط عقدة الشبكة المحلية اللاسلكية THz-0,34



ويعرض الشكل 11 الجانب الأمامي من مرسل مستقبل THz-0,34، والذي يتألف من مرشح ذي تجويف THz-0,34، ومازج توافقي THz-0,34، وسلسلة مزدوجة التردد THz-0,17 ودارة انحياز تغذية. ويعتبر المازج التوافقي THz-0,34 أهم وحدة في الجانب الأمامي من المرسل المستقبل؛ ويستند مبدأ عمله على تأثير الفولطية–التيار غير الخطي لصمام ثنائي schottky مضاد التوازي (I-V). وتوفر السلسلة المزدوجة التردد THz-0,17 ذات الهيكل التوافقي 8 إشارة ذبذبة للمازج التوافقي THz-0,34، الذي يتألف من مضاعف مزدوج التردد للنطاق Q، ومضخم للنطاق Q، ومقسِّم قوة للنطاق Q، ومضاعف مزدوج التردد للنطاق W، وموهِّن قابل للتعديل للنطاق W، ومضخم للنطاق W، ومضاعف مزدوج التردد للنطاق G، وما إلى ذلك. كما أنه يتضمن دارة مضاعفة مزدوجة التردد بثلاث درجات ومضخم تحريك بدرجتين.

الشكل 11

الجانب الأمامي من شبكة محلية لاسلكية THz-0,34



5 الاستشعار والتصوير

تمتلك الموجات التيراهيرتزية نفاذية مواد معتدلة واستبانة مكانية جيدة، إلى جانب خصائص فريدة لا تتمتع بها نطاقات التردد الكهرمغنطيسية الأخرى، مثل بصمة طيف الكواشف، وتمييز الحمض النووي ذي الطاقة الواحدة والطاقتين، وفَرق امتصاص الماء والجليد، والحساسية تجاه شوائب أشباه الموصلات؛ وفضلاً عن ذلك فإن الموجات التيراهيرتزية آمنة أيضاً بالنسبة للجسم البشري. وبناء على هذه الوقائع فإن من المنتظر نشوء طائفة واسعة من تطبيقات الاستشعار والتصوير.

1.5 أسلوب توليد التيراهيرتز

يُجمل الجدول 6 العلاقة بين أساليب توليد التيراهيرتز وتكنولوجياتها.

الجدول 6

أساليب توليد التيراهيرتز وتكنولوجياتها

طريقة التوليد	تكنولوجيا التوليد	المادة	الوظيفة
إثارة ضوئية ذات نبضة فائقة القصر	هوائي موصل للضوء	LT-GaAs	نظام القياس الطيفي التيراهيرتزي في النطاق الزمني THz-TDS عملية في ظل درجة حرارة الغرفة
بصريات غير خطية	توليد التردد التفاضلي المعلمي	GaAs، GaP، GaSe، ZGP، PPLN، BD-GaAs، OP-GaAs	طول موجة متغاير عملية في ظل درجة حرارة الغرفة
مزج الحزم	موصل ضوئي UTC-PD	LT-GaAs InP/InGaAs	عملية في ظل درجة حرارة الغرفة
الليزر	QCL	GaAs/AlGaAs، InGaAs-AlInAs/InP	عرض خط ضيق عملية في ظل درجة حرارة قرّية
إلكترونيات الحالة الصلبة	Gunn، IMPATT، RTD شبه موصل مركب	GaAs، InP، Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT، HEMT، mHEMT، pHENT	طول موجة ثابت عملية في ظل درجة حرارة الغرفة
أنبوب إلكتروني	BWO، Gyrotron		طول موجة متغاير عملية في ظل درجة حرارة الغرفة

(1) الإثارة الضوئية ذات النبضة فائقة القصر

يعتبر هذا الأسلوب الأكثر شيوعاً في الوقت الحاضر للتوليد النبضي للتيراهيرتز. وعبر الإثارة الضوئية للبلور غير الخطي (NLC)، وهوائي موصل للضوء (PCA)، وأشباه الموصلات، والموصلات الفائقة، وما إليها، وباستخدام ليزر نبضي فائق القصر تبلغ مدته نحو فيمتوثانية، فإن بالمستطاع إحداث تشكيلات تيار موصلة للضوء تقل مدتها عن بيكوثانية ضمن أشباه الموصلات، وبالإمكان توليد نبضة بصرية تيراهيرتزية عريضة النطاق باستخدام استقطاب غير خطي ثانوي يستعمل وسيطاً غير خطي وغير رنان. ويُستعمل هذا الأسلوب على نطاق واسع في نظام القياس الطيفي التيراهيرتزي في النطاق الزمني (THz-TDS).

ولنظام THz-TDS نسبة عالية للإشارة إلى الضوضاء (نسبة *S/N*) بالمقارنة مع مقياس طيف الأشعة تحت الحمراء البعيدة لتحويل فوريه الذي يستخدم مصدر ضوء حراري تقليدي، وهو يطبق في قياس الطيف التيراهيرتزي والتصوير، وما إلى ذلك. ورغم أنه يتعين اختيار الهيكل، والتركيب البللوري، وطول موجة الإثارة الليزرية على التوالي من أجل هيكل الهوائي الموصل للضوء، وأشباه الموصلات، والبللور غير الخطي، فإنه نتيجة الإنجازات الأخيرة في ميدان تكنولوجيا الليزر النبضي ذات النبضة فائقة القصر، وعبر استعمال مضخم متجدد لتوليد ضوء بنبضة عالية القوة كضوء إثارة، فإن بالمستطاع استخلاص قوة حقل كهربائي عالية.

(2) البصريات غير الخطية

يتوزع هذا الأسلوب إلى صنفين هما التوليد المعلمي وتوليد التردد التفاضلي (DFG). ويشتمل التوليد المعلمي على تحويل طول الموجة من خلال البولاريتونات الفونونية ضمن البللورات غير الخطية مثل LiNbO3. وهو يتضمن طول موجة قابل للتوليف وعملية في ظل درجة حرارة الغرفة، وبالمستطاع مصاغرة حجم مصدر الضوء من الحجم المكتبي إلى حجم اليد إلى جانب مصاغرة ليزرات الإثارة. وقد أمكن مؤخراً استخلاص نبضة تيراهيرتزية بقوة ذروية تتجاوز 1 kW، وهو ما يشابه القيم المستخلصة باستخدام الليزر ذي الإلكترونات الحرة (FEL).

ومن جهة أخرى فإن توليد التردد التفاضلي (DFG) هو توليد تردد تفاضلي باستخدام تأثير بصري غير خطي ثانوي لبللورات غير خطية. وفي السنوات الأخيرة أفادت التقارير عن أساليب توليد بالبللورات العضوية مثل DAST وBNA، ومن حيث قوة التوليد فقد أُبلغ عن خرج ميليواط باستخدام توليد التردد التفاضلي داخل التجاويف.

(3) المزج الضوئي

من خلال حقن ضوء ليزري مزدوج طول الموجة في جهاز موصل ضوئي أو صمام ثنائي ضوئي يتم توليد موجة تيراهيرتزية وهي تردد تفاضلي بصري باستخدام التحويل الكهرضوئي عبر المزج الضوئي. وبالنسبة للصمام الثنائي الضوئي فإنه يمكن توليد ضوء تيراهيرتزي يتجاوز 1 THz بفضل الصمام الثنائي الضوئي الحامل المرتحل الواحد (UTC-PD) الذي يمتلك خصائص السرعة العالية والخرج العالي.

(4) الليزر

يمتلك الليزر الشلالي الكمي (QCL) هيكلاً متطبقاً مع مواد أشباه الموصلات لارتفاعات حواجز طاقة مختلفة في الثخانة النانومترية، ويحقق التذبذب الليزري عبر الانتقال بين النطاقات الفرعية. ومع أنه، من حيث المبدأ، فإن ذلك سيشكل عرضاً خطياً ضيقاً للغاية فإنه عملياً يقتصر على العمليات منخفضة الحرارة (تبلغ درجة حرارة العمل القصوى من خلال التحريك النبضي 200 K). على أن قوة الخرج عند تردد يتجاوز 1 THz ضخمة نسبياً.

(5) إلكترونيات الحالة الصلبة

جرى تقليدياً تطوير هذه الإلكترونيات كأجهزة للموجة الصغرية أو الموجة المليمترية. وتستخدم صمامات غان الثنائية الانتقال بين الأودية حيث إن لها نطاقات توصيل ذات كتل فعالة مختلفة، وتعتبر الصمامات الثنائية للوقت الانتقالي الانهيارية وذات تأين الأثر (IMPATT) والصمامات الثنائية للوقت الانتقالي ذات الحقن النفقي (TNNETT) صمامات ثنائية للوقت الانتقالي تخلق مجالات حقلية عالية تنتقل فيها الإلكترونات.

وتتألف الصمامات النفقية الرنينية من هيكل حاجز مزدوج مع غطاء رقيق شبه موصل، وتحقق المقاومة السالبة التفاضلية باستخدام ظاهرة الأنفاق التي تحدث هناك، وتستطيع استخلاص ذبذبة أساسية تتجاوز 1 THz (ولو أن الخرج صغير).

وكجهاز عملي شبه موصل وعالي التردد مستخدم حالياً في المذبذبات، والمضخمات، بل وحتى الدارة المتكاملة الأحادية ذات الموجة الصغرية (MMIC) فإن هناك ترانزيستور HBT (ترانزيستور ثنائي الأقطاب ومتباين أشباه الموصلات) الذي يستخدم أشباه نواقل مركبة، وترانزيستور HEMT (ترانزيستور التنقلية العالية للإلكترونات). وفي حين أن من المنتظر أن يعمل النوع InP ذو الخصائص المادية مثل الانتقالية العالية للإلكترونات بشكل أسرع، فإن هناك تقارير عن أجهزة تعمل بما يتجاوز بضع مئات من الجيغاهيرتزات، باستخدام تكنولوجيات مثل pHEMT (HEMT كاذب) وmHEMT (HEMT انسلاخي) التي تسعى إلى سرعات أكبر.

(6) الأنبوب الإلكتروني

تتولد الموجة التيراهيرتزية بفعل مذبذب موجات عكسية (BWO) من خلال تفاعل دارة الموجات البطيئة والإلكترونات؛ وعبر إشعاع سميث–بورسيل من خلال تأثير سميث–بورسيل الذي يحدث عندما تمر الإلكترونات فوق مشبك انعراج معدني؛ وبفعل الجيروترون عبر عمل ميزر رنين سيكلوتروني يشمل تغييرات كتلة الإلكترونات نتيجة التأثير النسبي. وفي حين أن الخرج كبير عموماً فإن حجم الغلاف ضخم بدوره.

2.5 الكاميرات التيراهيرتزية

فيما يلي الاتجاهات في محساس الصفيف التيراهيرتزي ثنائي الأبعاد المستند إلى تكنولوجيا محساس صفيف الأشعة تحت الحمراء غير المبرد من نوع البولومتر.

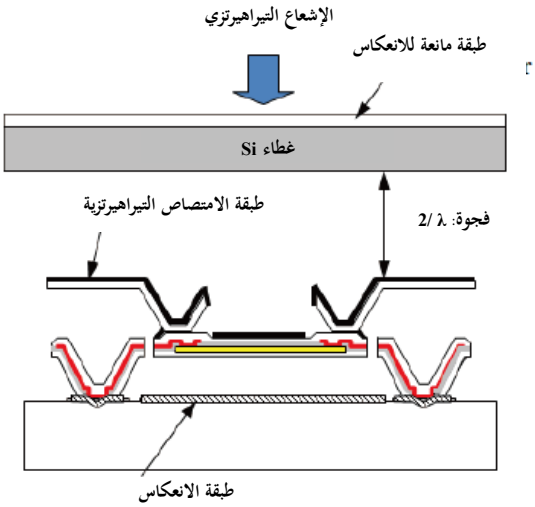
ويعرض الشكل 12 صورة لكاميرا أشعة تحت الحمراء مجهزة بمحساس صفيف أشعة تحت الحمراء ثنائي الأبعاد مع عدد للبيكسيلات يبلغ 240X320، وبُعد فاصل بينها قدره 23,5 µm عند الحقن بليزر شلالي كمي ذي تردد قدره 3,1 THz. ولهيكل البيكسيلات في هذه الحالة طبقة امتصاص تيراهيرتزية إضافية، وعبر تعديل مقاومة صفيحة الغطاء الرقيق من المعاوقة المفرغة التي تقابل 377 Ω فإن الحساسية عند نحو 3 THz تتحسن بمقدار خانة واحدة (الشكل 13 (أ)). وفضلاً عن ذلك فإن محساس الصفيف التيراهيرتزي

ذا عرض النطاق الضيق المعروض في الشكل 13 (ب) قد تم تطويره لأغراض تحسين الحساسية بمقدار مرتين إضافيتين إلى أربع مرات إضافية عند بعض أطوال الموجات فحسب.

ويظهر الشكل 14 اعتماد طول موجة NEP (القدرة الضوضائية المكافئة) لمحاسيس الصفيف التيراهيرتزي ذات عرض النطاق العريض وعرض النطاق الضيق ذاتها. وكما يتضح من النظر إلى خصائص محساس الصفيف التيراهيرتزي ذي عرض النطاق العريض فإنه يبدي خصائص NEP مسطحة عموماً من طول موجة قدره 3 µm إلى أقل قليلاً من 200 µm، لكن قيمة NEP تبدأ بالتدهور فوق 200 µm. ويعرض الشكل 15 والجدول 6 منظراً خارجياً ومواصفات لكاميرا تيراهيرتزية بحجم الكف مجهزة بأحد نوعي محاسيس الصفيف، وهو محساس الصفيف التيراهيرتزي ذو عرض النطاق العريض. وباستخدام السليكون عالي المعاوقة كمادة للعدسات التيراهيرتزية يتشكل غطاء بيريلين كطلاء غير عاكس على السيلكون. كما يجري تثبيت مرشح مانع للأشعة تحت الحمراء (مرشح شبكي معدني يسمح بإرسال أطوال موجات تزيد عن نحو 30 µm) أمام العدسات التيراهيرتزية. ويمكن التحكم بهذه الكاميرا من حاسوب باستخدام سطح بيني USB 2.0 ومقدورها أيضاً تسجيل بيانات الصور الرقمية في الحاسوب.

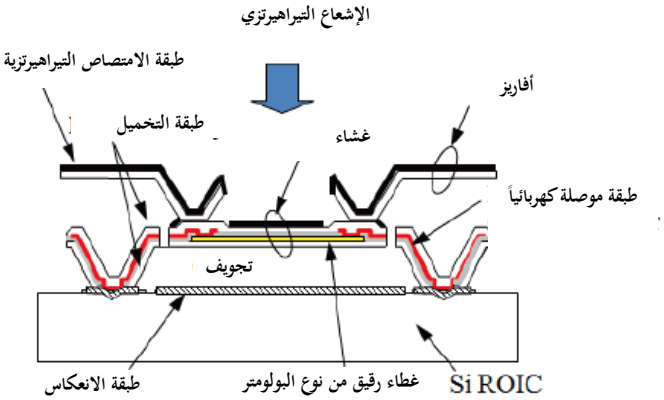
الشكل 12 (ب)

محساس صفيف تيراهيرتزي ضيق النطاق



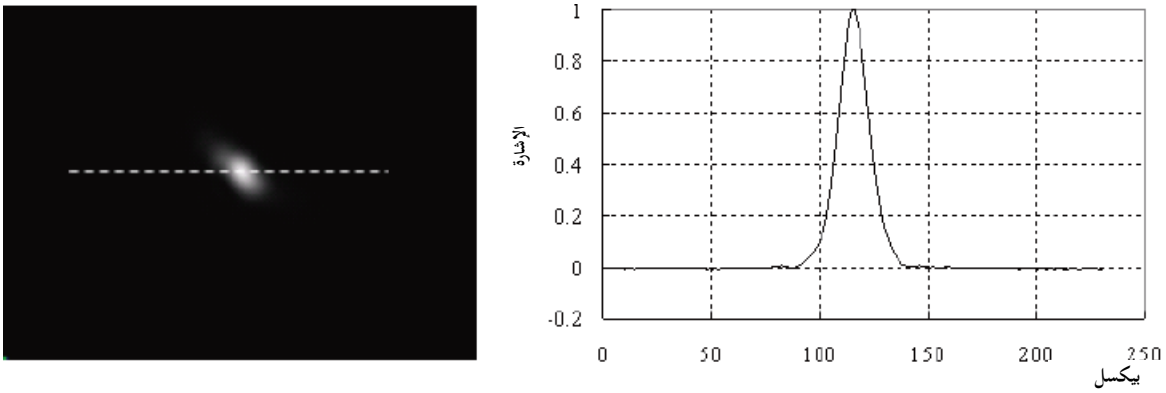
الشكل 12 (أ)

محساس صفيف تيراهيرتزي عريض النطاق



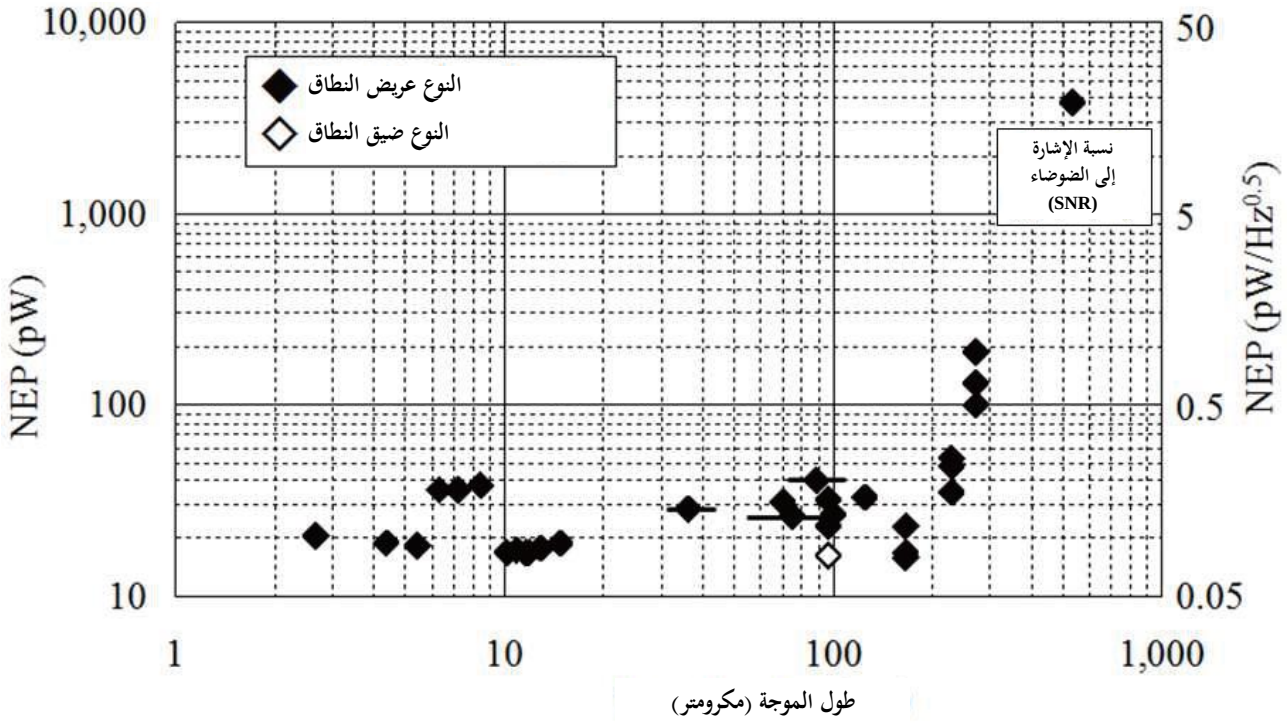
الشكل 13

مخطط إشعاع ليزر شلالي كمي لمحساس صفيف تيراهيرتزي مع عدد للبيكسيلات يبلغ 320 X 240، وبعد فاصل بينها قدره 23,5 µm



الشكل 14

اعتماد طول موجة القدرة الضوضائية المكافئة (NEP) لمحساس صفيف تيراهيرتزي



الشكل 15

منظر خارجي لكاميرا تيراهيرتزية

الجدول 7

مواصفات الكاميرا التيراهيرتزية

الأسلوب	نوع البولومتر
نسق الصفيف	عدد البيكسلات: 320 × 240 البعد الفاصل بين البيكسلات: 23,5 µm
مجال الرؤية	نحو 15° × 11° (عند التجهيز بعدسات 28 mm لمسافة بؤرة التركيز)
معدل الترتيل	30 Hz
الخرج	بيانات الصور الرقمية: USB2.0 الإشارة المتزامنة: BNC
وظيفة التصوير الثابت	الإشارة المتزامنة: 15 Hz، 7,5 Hz، 3,75 Hz، 1,875 Hz (خرج TTL: +5V)
وظيفة معالجة الإشارات	إدماج الترتيل مرشح مكاني
الوزن	نحو 550 g (بدون العدسات والمرشح)

3.5 قياس الطيف

يمكن تصنيف أنظمة قياس الطيف إلى المقياس التقليدي لطيف الأشعة تحت الحمراء لتحويل فورييه (FTIR)، ونظام القياس الطيفي التيراهيرتزي في النطاق الزمني (THz-TDS). ويُعتبر نظام مارتن–بوبليت الذي يشكل امتداداً للتكنولوجيا التقليدية تحت الحمراء مثالاً على مقياس FTIR. وتقوم أنظمة القياس الطيفية لكنس طول الموجة باستخدام أنبوب موجة انعكاسية لتغيير طول الموجة مباشرة في الموجة التيراهيرتزية، وأساليب التردد التفاضلي التي تستعمل ليزرين بطولي موجة متغايرين. على أن هناك مسائل مثارة تتعلق بمدى التغاير ودقة طول الموجة.

1.3.5 THz-TDS (نظام القياس الطيفي التيراهيرتزي في النطاق الزمني)

شهد العقد الماضي تطوير أداة جديدة قوية للقياس في ميدان التيراهيرتز أُطلق عليها اسم THz-TDS. ويتم توليد وقياس أشكال أمواج كهربائية لنبضة إشعاع تيراهيرتزية أحادية الدورة من خلال الكشف المبوب بنبضة ليزرية قصيرة لقياس الطيف بالأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR). وفي العادة فإن نبضة الإشعاع التيراهيرتزية أحادية الدورة تحتوي على مجموعة واسعة من الطيف بين 100 GHz و10 THz. ويزداد الإقبال على هذا الأسلوب في تشخيص المواد.

2.3.5 قياس FTIR للطيف (بالأشعة تحت الحمراء لتحويل فورييه)

للعديد من المواد ما يُسمى بأطياف البصمة في مدى التردد فوق 275 GHz. وفي الحقيقة فقد استخدم مدى التردد فوق ما يقرب من 1 000 GHz منذ ستينات القرن الماضي، وتم بالفعل تطوير بعض المنتجات التجارية. ويغطي النظام نطاق التردد كاملاً حتى مدى الأشعة تحت الحمراء المتوسطة. وفي نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة تعتمد الأطياف على السلوك ما بين الجزيئات، وتتوافر مكتبات طيفية عن جميع المواد الكيميائية المعيارية. وهكذا فإن بمقدور الكيميائيين استخدام نظام تجاري كأداة شائعة لتحديد المواد غير المعروفة. وفي منطقة الأشعة دون الحمراء البعيدة، أو نطاق تردد التيراهيرتز، فإن أطياف البصمة تعتمد على السلوك ما بين الجزيئات، وامتصاص الفونون، والروابط الهيدروجينية، أو ظروف الجزيئات المماثلة. وعلى خلاف الأشعة تحت الحمراء المتوسطة فليس هناك من مكتبة طيفية تجارية.

3.3.5 تحليل المواد

يتم تحليل الخصائص الصلبة والسائلة باستخدام نظام THz-TDS. ويُستخدم قياس استقطاب نطاق التيراهيرتز، مثلاً، لتقييم خصائص الانكسار المزدوج للمادة في كل نطاق. وباستعمال هذا النوع من وظيفة التقييم فقد بدأ أيضاً تسويق أجهزة لتحليل المتجازئات البصرية البوليمرية. ومن جهة أخرى، وعلى الرغم من أن الأمواج التيراهيرتزية معرضة جداً للامتصاص من جانب الماء، فقد أضحى بالإمكان قياس عينات محتوية على الماء، وهو أمر كان يعتبر صعباً تقليدياً، وذلك باستخدام مقياس طيف الانعكاس الكلي الموهن (أسلوب ATR) في الترددات التيراهيرتزية.

ومع هذا الأسلوب، وبما أن بالمستطاع استخلاص خصائص العينة دون اختراق الماء، فإن من الممكن أيضاً كشف الخلايا ضمن سائل الاستنبات باستخدام أسلوب ATR، ومن المتوقع الآن أن يشكل ذلك أسلوباً فعالاً للتطبيقات التيراهيرتزية في التكنولوجيا البيولوجية.

4.5 الاختبار غير التدميري

1.4.5 تطبيقات المنتجات الصناعية

ما يزال الطلب على التصوير التيراهيرتزي في المنتجات والمواد الصناعية يتسم بجذور راسخة للغاية. ويرجع ذلك إلى أن بالمستطاع فحسب استخدام الأمواج الراديوية إلى النطاقات التيراهيرتزية، أو الإشعاع مثل الأشعة السينية، للرؤية عبر الأجسام المعتمة في الضوء المرئي. ومن بين هذه الأساليب فإن مناولة الإشعاع المؤين، مثل الأشعة السينية، يترافق مع مخاطر وعوائق، في حين أن للأمواج الراديوية إلى النطاقات التيراهيرتزية طاقة منخفضة ككموم وهي غير متأينة، كما أن الأشعة السينية محفوفة بالمشكلات عموماً من حيث كشف العناصر الخفيفة مثل الكربون. ومن بين الأمواج الراديوية إلى النطاقات التيراهيرتزية، بالمقارنة مع الأمواج الصغرية على سبيل المثال والتي تمتلك، من حيث المبدأ، أطوال موجات طويلة واستبانة تصويرية رديئة (استبانة مكانية)، فإن للأمواج المليمترية إلى الأمواج التيراهيرتزية التي تحقق الاستبانة المكانية في حدود الميلمتر أو أقل فائدة أعظم بكثير للتطبيق في التصوير.

وفي المنتجات الصناعية فإن المواد غير المعدنية التي ترسل موجات تيراهيرتزية كثيرة جداً في حياتنا اليومية. ومن بين أبرز هذه المنتجات ما هو مصنوع من البلاستيك، والفينيل، والورق، بينما هناك منتجات أخرى مصنوعة من السيراميك والمطاط وتمتلك وظائف مختلفة ولها في الغالب قيمة مضافة عالية. وكأمثلة على ذلك فهناك المكونات الطبية التي تستخدم مقاومة السيراميك للحرارة ومرونة المطاط. وتُستعمل هذه المنتجات على نطاق واسع في مجالي الطاقة والطب، وثمة حاجة شديدة إليها للكشف عن الجسيمات الغريبة. وكثيراً ما يصل حجم الاختلالات إلى نحو 1-10 µm على الأقل، وتدعو الحاجة إلى السرعة وإلى معدل عال للإشارة إلى الضوضاء.

وتعتبر تكنولوجيا التصوير المقطعي المحوسب التيراهيرتزي (THz CT) واعدة باعتبارها التكنولوجيا التصويرية التيراهيرتزية في الاختبارات غير التدميرية التي تتعذر إدارتها باستخدام الأشعة السينية. وبمقدور الأمواج التيراهيرتزية التي تستطيع استخلاص معلومات مطيافية أن تكشف عن العيوب، وكذلك عن المعلومات المتعلقة بنوع هذه العيوب، وهي تجتذب الانتباه باعتبارها تكنولوجيا يمكن أن تأتي بقيمة مضافة جديدة إلى التحليل. وتشمل العيوب التي تحتاج إلى كشف الجسيمات الغريبة، وكذلك عدم استواء الغطاء الرقيق، وعيوب الطلاء، وما إلى ذلك.

ويصل عمق الدقة المرغوب عموماً إلى بضعة مكرومترات، ولكن عند معاينة الطبقات التحتية لأشباه الموصلات وما إليها فإن هناك حالات يتطلب فيها الأمر خصائص كهربائية لثخانة الغطاء الرقيق تقل عن بضعة مئات من النانومترات. ومع أنه كان من المعتقد أن قياس مثل هذا الغطاء الرقيق صعب باستخدام الأمواج التيراهيرتزية فإنه بفضل الإنجازات الأخيرة في تطوير التكنولوجيات فقد بدأ ذلك يبدو ممكناً.

2.4.5 التطبيقات البيولوجية والطبية

هناك طائفة واسعة من تطبيقات المعاينة السريرية هذه الأيام تتراوح بين معاينات أمراض نوعية الحياة إلى معاينات الواسمات السرطانية، إذا ما أدرجنا تطبيقات الأبحاث. ومن بين المبادئ الأساسية لاستشعار البروتينيات المستهدفة وما إليها في الجسم الحي فإن هناك الكثير المنمذج وفقاً لآلية التعرف على الكائنات الحية مثل تفاعل المستضدات–الأضداد.

على أنه ليدرك الإنسان وجود/غياب هذا التعرف فإن الأمر يقتضي مستوى أعلى من المعالجة. وعلى سبيل المثال ففي أسلوب كشف المحفزات الذي يستعمل طريقة معاينة يطلق عليها اسم المقايسة المناعية الإنزيمية، يتم تثبيت ضد مُلتقط يرتبط تحديداً بالمحفز إلى الطبقة التحتية، وبعد التفاعل مع عينة، يُكشف عن وجود/غياب هذا المحفز باستخدام ضد الكشف أو واسم الكشف. وبهذه الطريقة تُستخدم التفاعلات متعددة المراحل للإشارة إلى نتائج الاختبار عبر اللون أو التألق. وقد صُممت مثل هذه الواسمات كي تُنتج بشكل كفء اللون عبر أدنى تفاعل مع الطبقة التحتية، وفي قياسات اللمعان الكيميائي تتحقق حساسية كشف في حدود البيكوغرام. على أن للمعاينات متعددة المراحل مسائل كتطلبها للعديد من المواد الكاشفة ولوقت طويل للمعاينة، بالإضافة إلى زيادة عوامل الخطأ عبر العملية المتعددة المراحل.

وفي ظل هذه الظروف فقد أفاد فريق بحوث ألماني عام 2000 عن إمكانية القيام بالكشف دون حاجة إلى واسمات باستخدام الأمواج التيراهيرتزية. وأظهر هؤلاء الباحثون في تجاربهم أن هناك فوارق في دليل انكسار النطاق التيراهيرتزي والإنفاذية في الحمض النووي ذي الطاقة الواحدة والطاقتين. وبعد ذلك اقترح فريق بحوث في الولايات المتحدة أسلوباً للكشف عن ربط الأفيدين والبيوتين من خلال تأخر الطور في شكل الموجة الزمنية لنظام THz-TDS. ويعني ذلك أن من الممكن كشف وجود/غياب الربط، دون استخدام الواسمات، وذلك من التغيرات في مؤشر الانكسار وامتصاص البوليمرات البيولوجية في النطاقات التيراهيرتزية. وفي اليابان، وباستخدام نظام قياس تصويري يتألف من ليزر شلالي كمي وكاميرا تيراهيرتزية، ثبِّت خط من مركبات الجزيئات الصغيرة على مرشح غشائي، وتم بنجاح الكشف عن البروتينات التي ترتبط بها تحديداً في صيغة صور، مما يؤكد أن بالمستطاع الكشف عن المواد البيولوجية مثل البروتينات بسرعة، وسهولة، وبطريقة خالية من الواسمات.

ومن جهة أخرى هناك مسألة حساسية الكشف كموضوع مهم من موضوعات تطوير التكنولوجيا. وتندرج حساسية المعاينة المطلوبة للمعاينات السريرية في مدى الميليغرام إلى البيكوغرام، وتمس الحاجة على وجه خاص إلى حساسية المعاينة في المدى من النانوغرام إلى البيكوغرام في المعاينات عديمة الواسمات. ومن الأمثلة على تطبيقات المعاينة التي تتطلب مثل هذه الحساسية الصغيرة يمكن طرح تطبيق التشخيص التنبؤي بشأن الأمراض المتعلقة بالمناعة الذاتية الناجمة عن الأضداد الذاتية في الدم.

وبصفة عامة فإن الحماية من غزو البكتيريا والفيروسات من الخارج يحدث عبر التفاعل المناعي ضمن الجسم. على أنه بالنسبة لأمراض المناعة الذاتية فإن المواد المنخرطة في المناعة ضمن الجسم تهاجم الجسم. وعلى سبيل المثال فإنه في مرض السكري من النمط 1، تم اكتشاف أضداد ذاتية تستهدف ثلاثة أنواع من البروتينات البنكرياسية، ومن المعروف أن لدى 70-90% من المرضى واحداً على الأقل من هذه الأضداد الذاتية. وبالإضافة إلى ذلك فقد جرت دراسة العلاقة بين هذه الأضداد الذاتية الثلاثة ووقوعها، وكانت هناك علاقات واضحة. ولذلك فإنه من خلال إجراء معاينات أولية لمعرفة ما إذا كانت هناك أضداد ذاتية أم لا ضمن الجسم يمكن توقع بدء المرض، وبالمستطاع استخدامها في الوقاية.

ومن المحبذ إجراء مثل هذه المعاينات من أجل الفحوص الصحية، ومن المهم تطوير تكنولوجيا للمعاينة تكون سهلة، وسريعة، ورخيصة. وعند التطبيق في الفحوص الصحية فإن من الأفضل أن يكون بالإمكان توقع مختلف الأمراض عبر معاينة واحدة، لا فيما يتعلق بمرض السكري من الصنف 1 المشار إليه هنا فحسب. وبعبارة أخرى فإنه لإجراء معاينات في وقت واحد عبر مفاعلة المستضدات الذاتية لأمراض مختلفة مثبتة في رقاقة معاينة منفردة مع كميات صغيرة من الأضداد الذاتية المكتشفة في الدم المسحوب، فإن الأمر يقتضي تكنولوجيا قادرة على القيام بالمعاينات عديمة الواسمات والكشف عن المواد البيولوجية بمقادير في حدود البيكوغرام.

ووفقاً لاستقصاء قامت به شركة Fuji-Keizai فقد كان من المتوقع أن تتمتع عقاقير الاختبار الخاصة بالمعاينات المصلية المناعية التقليدية، بما في ذلك المعاينات المستندة إلى تفاعل المستضدات–الأضداد، بسوق محلية بقيمة 157,2 مليار ين خلال السنة المالية 2008 و168 مليار ين في السنة المالية 2013. وتمثل هذه السوق نسبة تزيد عن 40% من سوق العقاقير، وتشكل أعلى المعدلات. ومع ظهور تكنولوجيا المعاينة عالية الدقة وعديمة الواسمات فإن من المنتظر أن تدخل هذه الأسواق وأن تسهم في توسيع الحجم السوقي.

ومن ناحية أخرى فإن من المفترض وجود مثل هذه الاحتياجات إلى المعاينات عديمة الواسمات ومواد التقفي في سياقات مختلفة، وستكون تأثيراتها الجانبية عظيمة. ويشمل ذلك الميدان الأمني في معاينة الغازات الخطرة، والأسلحة البكتريولوجية، والمتفجرات؛ ومعاينة الفيروسات المعدية مثل أنواع الإنفلونزا الجديدة حيث يسود القلق من حدوث جائحات؛ ومعاينة العناصر النزرة في البيئة، ومبيدات الآفات المتبقية في المنتجات الزراعية، والمضادات الحيوية المتبقية في الحيوانات الزراعية.

ولذلك فإن من المهم السعي إلى التطوير المبكر لتكنولوجيا المعاينة عديمة الواسمات كبنية تحتية، والبحوث المتعلقة بانتقائية مواد المعاينة المستندة إلى هذه التكنولوجيا، وأنشطة البحث والتطوير للنهوض بحساسية الكشف. ومن بين تكنولوجيات تحسين حساسية كشف الموجات التيراهيرتزية هناك وسيلة تستخدم شبكة معدنية كمحساس، وقد أدت إلى تكنولوجيات تمكّن من كشف البروتينات في حدود نانوغرام/مم.

وبدمج تكنولوجيا الكشف عديم الواسمات لمواد التقفي بتكنولوجيا التصوير فإن مدى أوجه الاستخدام سيواصل التوسع. وعل وجه الخصوص فسيغدو بالمستطاع إجراء معاينة شاملة للبروتينات التي ترتبط تحديداً بصفيفات الجزيئات الصغيرة وصفيفات السلسلة السكرية، وستضحي تكنولوجيا يمكن أن تتوسع إلى ميدان الكشف عن المخدرات. وفضلاً عن ذلك فإن الكشف عديم الواسمات باستخدام تكنولوجيا الموجات التيراهيرتزية سيوضح وجود البروتينات التي أُغفلت حتى الآن بسبب تعذر وسمها، ومن المتوقع أن تصبح تكنولوجيا فحص قوية في بحوث علوم الحياة.

6 الأنشطة المرتبطة بالتيراهيرتز ضمن المنظمة الدولية للتوحيد القياسي

في عام 2008 أنشأت فرقة المهام IEEE 802.15 مجموعة الاهتمام التيراهيرتزية (IG THz). وينصب تركيز هذه المجموعة في المقام الأول على الاتصالات التيراهيرتزية وتطبيقات الشبكات المتعلقة بها العاملة في نطاق الترددات التيراهيرتزية بين 275-000 3 GHz. وستشمل تطبيقات الاتصالات التيراهيرتزية هذه ما يلي: اتصالات لاسلكية (داخل المباني وخارجها) من مكوّن إلى مكوّن، ولوحة إلى لوحة، وآلة إلى آلة، وإنسان إلى آلة، وإنسان إلى إنسان. وتغطي تطبيقات الاتصالات التيراهيرتزية فئات متعددة ذات متطلبات متباينة. وعلى نحو ما هو متصور فإن الاتصالات التيراهيرتزية ستستخدم إجمالاً أساليب التشكيل اللاسلكي ذات التعقيد المحدود، وأنظمة الهوائيات شاملة الاتجاهات و/أو الاتجاهية، وستوفر عادة معدلات عالية جداً لنقل البيانات في مضاعفات 10 Gbit/s، وحتى 100 Gbit/s، للتكافؤ مع قدرات الألياف البصرية المستقبلية. ويمكن للأنظمة اللاسلكية التيراهيرتزية أن تساند مسافات إرسال تتراوح بين القصيرة جداً (بضعة سنتيمترات أو أقل) والمسافات الطويلة نسبياً التي تصل إلى عدة مئات من الأمتار.

وانصب تركيز مجموعة الاهتمام التيراهيرتزية على مسائل الطيف، ونمذجة القنوات، ورصد تطور التكنولوجيا. ومع تطوير تكنولوجيات مرسلة مستقبلة أكثر نضجاً فقد خطت فرقة المهام 802.15 خطوة إلى الأمام على طريق تطوير معيار جديد من خلال تشكيل لجنة دراسات في يوليو 2013 بهدف تحديد مدى صلاحية معيار بشأن 100 G (100 Gbit/s على وصلات لاسلكية 100/40 Gbit/s من نقطة إلى نقطة وبحزمة قابلة للتبديل).

وأنجزت لجنة الدراسات عملها في مارس 2014 بإنشاء فرقة المهام 3d. واستناداً إلى IEEE 802.15.3c ستعد فرقة المهام تعديلاً يحدد الطبقة المادية اللاسلكية من نقطة إلى نقطة القابلة للتبديل بشأن المعيار IEEE Std. 802.15.3 العاملة في معدلات بيانات طبقة مادية في مدى يصل عادة إلى 100 Gbit/s أو أكثر مع حلول احتياطية بمعدلات بيانات أدنى إذا اقتضى الأمر ذلك. ويجري التشغيل في النطاقات من 60 GHz إلى الاتصالات اللاسلكية البصرية ضمناً في مديات قصيرة تبلغ بضعة سنتيمترات فحسب وحتى عدة مئات من الأمتار.

وبالإضافة إلى ذلك تم تحديد تعديلات على طبقة التحكم بنفاذ الوسيط (MAC) اللازمة لدعم هذه الطبقة المادية الجديدة. وتشمل التطبيقات الممكنة الباعثة على الاهتمام مراكز البيانات اللاسلكية، وتنزيل الأكشاك، والاتصالات اللاسلكية ضمن الأجهزة، و التوصيل اللاسلكي المباشر/غير المباشر.

ومع أن التركيز الأولي لمجموعة الاهتمام التيراهرتزية كان على مدى التردد فوق 275 GHz فإن مدى التردد في فرقة المهام 3d سيظل مفتوحاً لنطاقات أخرى مثل النظر في النطاق 60 GHz وبصريات الفضاء الحر (FSO). وهكذا فإن طول الموجة المهمة بالنسبة للطبقة المادية ستكون الموجة المليمترية أو الأقصر من ذلك.

وتشمل المسائل الأساسية في عملية وضع التعديل تعيين نطاقات تردد محددة فوق 275 GHz. أما المسائل الأساسية في اختيار نطاقات التردد المناسبة فهي خصائص التوهين الناجم عن الغازات الجوية في مدى التردد من 100 GHz إلى 1 000 GHz. وهناك توهين رنيني محدد بفعل الأوكسجين وبخار الماء. ويتم ببساطة تقدير النطاق المجاور المهم للاتصالات التيراهيرتزية بتفادي خطوط التوهين الرنيني المقابلة. ويُجمل الجدول 8 مدى الترددات المناسب وعرض النطاق المجاور.

الجدول 8

مدى التردد المناسب وعرض النطاق المجاور

مدى التردد (GHz)	عرض النطاق المجاور (GHz)	الخسارة الإضافية بالتوهين الرنيني (km/dB)
320-200	120	10 >
320-275	45	10 >
360-335	25	10 >
370-275	95	100 >
445-380	65	100 >
525-455	70	100 >
725-625	100	100 >
910-780	130	100 >

وإلى جانب مراعاة خصائص التوهين فإن مسألة نضج التكنولوجيا تضطلع بدور مهم. وبالاستناد إلى البيانات العملية لاختبارات الإرسال وإلى مشروعات البحوث الجارية فإن من المحتمل أن يكون نطاق التردد بين 275 GHz و325 GHz هو الهدف ضمن فرقة المهام 802.15.3d.

ومن المنتظر إصدار دعوة إلى تقديم المقترحات في النصف الثاني من عام 2015 موجهة نحو إنجاز المعيار في النصف الأول من عام 2017. وبالتوازي فإن مجموعة الاهتمام التيراهيرتزية تواصل نشاطها في رصد التطورات التكنولوجية المهمة لحالات الاستخدام الأخرى غير الحالات التي تغطيها فرقة المهام 3d. وسيؤدي ذلك في نهاية المطاف إلى حفز إنشاء لجنة دراسات واحدة أو أكثر لبحث المعايير في مدى التردد التيراهيرتزي.

7 ملخص

تشهد خصائص الأجهزة والأنظمة التيراهيرتزية المدروسة في هذا التقرير تحسناً سريعاً بفضل تقدم تكنولوجيات الأجهزة. وقد تتمتع أنظمة الاتصالات اللاسلكية التيراهيرتزية بإمكانيات ضخمة للإرسال بمعدل بيانات عال يقارب 100 Gbit/s علماً بأن سرعة هذا المعدل تُناقش حالياً ضمن IEEE802. وتدعو الحاجة إلى مراعاة دراسة التقاسم بين الخدمات المنفعلة والنشيطة واستعراض لوائح الراديو لطرح هذه الأجهزة في الأسواق في المستقبل القريب.

8 بيبليوغرافيا

[1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, January 2014; https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf

[2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html

[3] APT/ASTAP/REPT-04 - Technology trends of telecommunications above 100 GHz.