

الاتحاد الدولي للاتصالات

# ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التقرير ITU-R SM.2392-0  
(2016/08)

## تطبيقات الإرسال اللاسلكي للقذرة (WPT) عبر حزم التردد الراديوي

السلسلة SM  
إدارة الطيف

الاتحاد الدولي للاتصالات



## تمهيد

يُضطلع 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.

## سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يُرد 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 الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات 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>)

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 الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM

**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، 2018

© ITU 2018

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.2392-0

## تطبيقات الإرسال اللاسلكي للقذرة (WPT) عبر حزم التردد الراديوي

(2016)

## جدول المحتويات

الصفحة

2	.....	مقدمة	1
3	.....	التطبيقات التي طورت لاستخدام التكنولوجيا WPT عبر حزم الترددات الراديوية	2
3	.....	شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً (معرف هوية التطبيق: a1)	1.2
6	.....	شاحن لاسلكي للأجهزة المتنقلة (معرف هوية التطبيق: a2)	2.2
9	.....	صفائح نقل الطاقة لاسلكياً (معرف هوية التطبيق: b1)	3.2
10	.....	نقل طاقة الموجات الصغيرة (MPT) في أنابيب (معرف هوية التطبيق: b2)	4.2
12	.....	مباني الموجات الصغيرة (معرف هوية التطبيق: b3)	5.2
13	.....	الإرسال اللاسلكي للطاقة إلى أهداف متحركة/طائرة (معرف هوية التطبيق: c1)	6.2
19	.....	الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة (معرف هوية التطبيق: c2)	7.2
23	.....	الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية (معرف هوية التطبيق: c3)	8.2
27	.....	ساتل الطاقة الشمسية (معرف هوية التطبيق: c4)	9.2
28	.....	التكنولوجيات المستخدمة في تطبيقات الإرسال اللاسلكي للطاقة	3
31	.....	المنظمات المتوقعة مساهمتها في تقييم تكنولوجيا الإرسال اللاسلكي للطاقة	4
31	.....	أوروبا	1.4
32	.....	اليابان	2.4
33	.....	المنظمات الدولية الأخرى	3.4
33	.....	حالة الطيف بالنسبة للإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية	5
33	.....	الخلاصة	6

## 1 مقدمة

تعتبر تكنولوجيا الإرسال (أو النقل) اللاسلكي للقدرة (WPT) واحدة من تكنولوجيات تغيير المشهد. وستسنى لنا التحرر من الافتقار إلى الطاقة الكهربائية عندما يتم الإمداد بهذه الطاقة لاسلكياً. ويعود إرسال القدرة باستخدام الموجات الراديوية إلى بواكير العمل الذي قام به نيكولا تيسلا عام 1899. وقد قام تيسلا بمحاولته الأولى لإرسال القدرة بدون أسلاك في عام 1899. وقد استخدم قدرة منخفضة التردد بتردد 150 kHz، بيد أن هذه المحاولات لم يكتب لها النجاح. وبالتوازي مع تجارب تيسلا الأولى في مجال التكنولوجيا WPT، اقترح م. هوتن وم. لو-بلان جهازاً وطريقة لتشغيل مركبة كهربائية (EV) بالحث في عام 1894 باستخدام مولد تردد متغير (AC) بتردد 3 kHz تقريباً [HUT 94]. وقد طورت المركبات الكهربائية خلال فترة قصيرة من الزمن بعد المحرك البخاري، منذ مائة عام تقريباً. وقد بدأ كل من الإرسال WPT الحثي والذي يطلق عليه "الإرسال بدون حزم" والإرسال WPT عبر حزم الترددات الراديوية والذي يطلق عليه "الإرسال بالحزم" في بدايات القرن العشرين.

ويعزى التطور الحالي في الإرسال WPT عبر حزمة التردد الراديوي إلى وليام براون في ستينيات القرن الماضي باستخدام تكنولوجيا الموجات الصغيرة التي طورت أثناء الحرب العالمية الثانية. فقد قام بإرسال قدرة الموجات الصغيرة من مرسل إلى مستقبل (من نقطة إلى نقطة) بكفاءة إجمالية (تيار مستمر (DC) - موجة صغيرة - تيار مستمر (DC)) مقدارها 54% في مختبره [BRO73]. وعند استعمالنا لتردد الموجات الصغيرة، فإن الإرسال WPT عبر الموجات الصغيرة يطلق عليه إرسال للقدرة عبر الموجات الصغيرة (MPT). وقد نفذت في ثمانينيات وتسعينيات القرن الماضي مشاريع بحثية كثيرة للشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية [SHI 14]. وظهرت المنتجات التجارية من الكبلات غير المتلامسة بعد القرن العشرين. وكانت نقطة التحول في التكنولوجيا WPT الحثية في عام 2006 عندما قدم معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) عرضاً توضيحياً لتكنولوجيا القدرة اللاسلكية غير الحزمية يطلق عليها التكنولوجيا WPT بالاقتزان الرنيني [KUR 07]. وقد بدأت تكنولوجيات WPT الرنينية تظهر في أسواق المستهلكين في الوقت الراهن. كما أن صناعة السيارات تسعى إلى استخدام تكنولوجيا WPT في تطبيقات المركبات الكهربائية (EV) في المستقبل القريب. ووقد نشرت في صورة التقرير ITU-R SM.2303 في عام 2014 معلومات حول الإرسال اللاسلكي للقدرة بواسطة تكنولوجيات غير حزم التردد الراديوي، باعتبارها إجابات جزئية على المسألة ITU-R 210-3/1. وبعد العرض التوضيحي للمعهد MIT، لفتت الانتباه مجموعة متنوعة من تكنولوجيات الإرسال اللاسلكي للقدرة بما في ذلك الحث المغنطيسي والاقتزان الرنيني والإرسال عبر حزم الترددات الراديوية، وغيرها، بوصفها تكنولوجيا مغيرة للمشهد.

ويقدم هذا التقرير معلومات تمهيدية عن التكنولوجيا WPT التي تستخدم حزم الترددات الراديوية بشكل أساسي. ويغطي التقرير أيضاً ضرباً أكثر اتساعاً من إرسال القدرة بالموجات الراديوية يمكن أن يشمل التطبيقات غير الحزمية مثل جني الطاقة، ولكنه لا يشمل الحث المغنطيسي ولا الرنين المغنطيسي ولا تكنولوجيا الاقتزان السعوي، والتي يتم تناولها في التقرير ITU-R SM.2303.

وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات بشأن التأثيرات بين الأنظمة WPT تلك والأنظمة الأخرى القائمة وجوانب السلامة مثل التعرض البشري للمجالات الكهرومغناطيسية، وذلك لتحقيق هذه التطبيقات.

- [BRO 73] Brown, W.C., "Adapting Microwave Techniques to Help Solve Future Energy Problems", 1973 G- MTT International Microwave Symposium Digest of Technical Papers 73.1, pp. 189-191, 1973.
- [HUT 94] Hutin, M. and M. Le-Blanc, "Transformer System for Electric Railways", US Patent Number 527,875, 1894.
- [KUR 07] Kurs, A., A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [SHI 14] Shinohara, N., "Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)", ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014.1

## 2 التطبيقات التي طورت لاستخدام التكنولوجيا WPT عبر حزم الترددات الراديوية

تتمثل الخصائص الرئيسية للتكنولوجيا WPT عبر حزم الترددات الراديوية في: (1) الإرسال اللاسلكي للقدرة لمسافات طويلة، (2) عدم وجود اقتران كهرومغناطيسي بين هوائي الإرسال والاستقبال هو ما يختلف عن الإرسال WPT بالاقتران الحثي والإرسال WPT بالاقتران الرنيني، (3) إمكانية تحقيق تطبيقات متنوعة قبل أجهزة الاستشعار ضعيفة القدرة وأجهزة الشحن الكهربائية عالية القدرة ونقل كميات ضخمة من القدرة من محطات الإمداد بالطاقة، وغيرها.

### 1.2 شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً (معرف هوية التطبيق: a1)

تعرف التوصية ITU-T Y.2221 [ITU10] شبكة أجهزة الاستشعار على أنها: شبكة تتألف من عُقد أجهزة استشعار موصولة بينياً يتم فيها تبادل البيانات المستشعرة عبر اتصالات سلكية أو لاسلكية. وتعد شبكات أجهزة الاستشعار اللاسلكية (WSN) واحدة من تكنولوجيات المعلومات الأكثر سرعة في التطور ويتوقع أن يكون لها ضرب متنوع من التطبيقات في شبكات الجيل التالي (NGN) استناداً إلى الورقة التقنية الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات بالاتحاد [ITU14] Y.2000. وتعد الكفاءة في استهلاك الطاقة أمراً بالغ الأهمية. وتنص هذه الورقة على ما يلي:

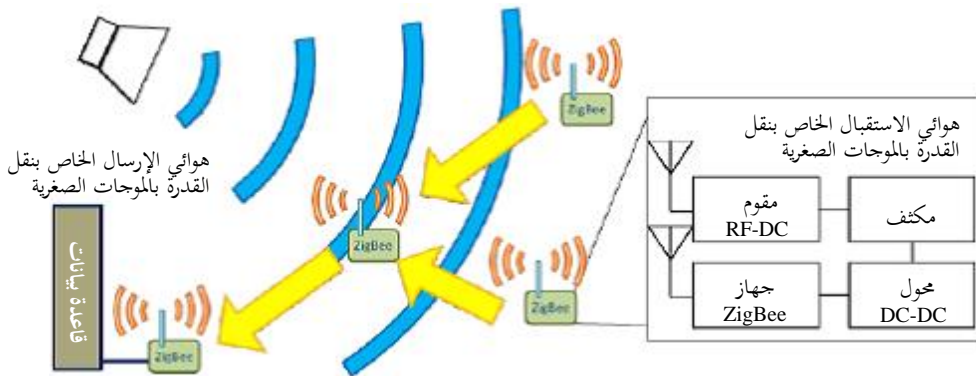
"يمكن توزيع أجزاء الشبكة WSN مكانياً في مساحة تبلغ العديد من الكيلومترات، لا سيما إذا كان مستعمل هذه الشبكة يقوم بإدارتها عبر الإنترنت. وفي نفس الوقت يمكن وضع عقد أجهزة الاستشعار في الأماكن التي يتعذر الوصول إليها أو قد يكون الموقع المحدد لكل عقدة من هذه العقد غير معروف. ويمكن للشبكة WSN أن تتألف أيضاً من العشرات أو المئات أو ربما الآلاف من عقد أجهزة الاستشعار. وفي ظل هذه الظروف يكون شحن هذه العقد من قبل المستعمل أمراً مستحيلاً. ويرجع ذلك إلى أنه يجب أن تتسم أي عقدة من هذه العقد بالكفاءة في استهلاك الطاقة من أجل استمرار في العمل ببطارية صغيرة وغير مكلفة لبضع شهور وربما لسنوات. وهذا التشغيل بالقدرة فائقة الانخفاض لا يمكن تحقيقه إلا باستعمال مكونات عتاد منخفضة القدرة".

### 1.1.2 الوضع في اليابان

يمكن لقدرة الموجات الصغيرة تشغيل جهاز استشعار لاسلكي بدون بطارية. ويمكن إرسال القدرة اللاسلكية إلى أجهزة الاستشعار التي تحتاج إلى كهرباء (الشكل 1.1.2). ويمكن لهذا النظام أن يحل المشكلة أعلاه. ويقوم الهوائي المقوم (rectenna)، الذي يتألف من هوائي ودارة تقويم بالثنائيات، باستقبال الموجة الراديوية وتقومها إلى تيار مستمر (DC). وكفاءة التحويل من تردد راديوي (RF) إلى تيار مستمر (DV) تساوي 100% نظرياً وتصل إلى 90% تقريباً عند 2,45 GHz في هوائي متطور.

### الشكل 1.1.2

### صورة لأجهزة الاستشعار ZibBee المزودة بالطاقة لاسلكياً [ICH12]



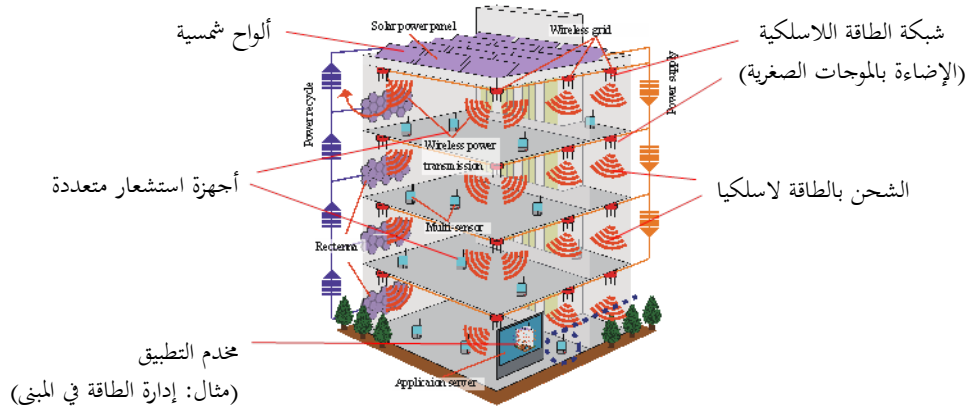
<sup>1</sup> يعني "معرف هوية التطبيق" رقم تعريف التطبيق ويشير إلى تطبيقات مختلفة للتكنولوجيا WPT الحزمية والتي يرد ملخص لها في الجدول 1.3.

يمثل جهاز الاستشعار ZigBee/IEEE802.15.4 جهاز استشعار يمكن تزويده بالطاقة لاسلكياً. وتشكل الشبكة ZigBee في شكل منسق ومسير وجهاز طرفي والمنسق عبارة عن جهاز واحد فقط في الشبكة يتولى تنسيقها. وتمثل وظيفة المسير في ترحيل البيانات من المسيرات والأجهزة الطرفية الأخرى فضلاً عن استشعار المعلومات. وترسل هذه الأجهزة الطرفية البيانات فحسب؛ وخلاف ذلك تكون خاملة. وبالتالي، يكون استهلاك الطاقة في الأجهزة الطرفية منخفضاً مقارنةً بالأجهزة الأخرى. ويقوم المسير والجهاز الطرفي بإرسال ما إجماليه 2 ms تقريباً من البيانات كل 1,4 ثانية ويقوم المنسق بإسقاط أي من هذين الجهازين من شبكته إذا لم تستقبل بيانات من أي منهما لمدة 15 ثانية. وأي جهاز خارج الشبكة يجب أن يؤدي الوظائف الروتينية اللازمة لكي يعاد ضمه إلى الشبكة. وعندما يعاد ضم الجهاز الطرف والمسير إلى الشبكة يتواصل مع بعضهما، فإنهما يستهلكان 9,46 mW و 57,4 mW، على التوالي للقيام بذلك وعندما لا ينضمان إلى الشبكة ويكونان في وضع الخمول، فإنهما يستهلكان 61,8 mW و 57,1 mW، على التوالي [ICH12]. واستهلاك الكهرباء مثال على أنه يمكننا تشغيل جهاز الاستشعار ZigBee بقدرة الموجات الصغيرة بشكل كامل.

وهناك شبكة يابانية مقترحة أخرى لأجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً تسمى شبكة الطاقة اللاسلكية أو الإضاءة بالموجات الصغيرة ويعرض مفهومها في الشكل 2.1.2 [SAK 10] [MAE 13]. ويوفر النظام الطاقة لاسلكياً كما يوفر لاسلكياً معلومات التعرف بواسطة الترددات الراديوية RFID في النطاق 920 MHz. ويستخدم النظام 4 قنوات (W 1) دون استشعار الموجة الحاملة للتعرف RFID المنقل للقدرة اللاسلكية. وتستخدم 77 قناة (1 mW) للتعرف RFID النشط في شبكة أجهزة الاستشعار. وينبغي أن تكون القدرة المستقبلية لحظياً أكبر من القدرة المستهلكة في جهاز الاستشعار. ويتم التحكم في القدرة المتوسطة المستهلكة بتغيير فترة العمل. ويستخدم مرسل متعدد القدرات في الغرفة ويقترح تنوع لتخالف الموجة الحاملة تستعمل فيه ترددات متعددة للحد من الموجات المتوقفة في غرفة مغلقة. ويحد تنوع تحالف الموجة الحاملة من الموجات المتوقفة بفعالية ويولد كثافة شبه منتظمة للقدرة في الغرفة.

### الشكل 2.1.2

#### مفهوم شبكة الطاقة اللاسلكية (الإضاءة بالموجات الصغيرة) [SAK 10]



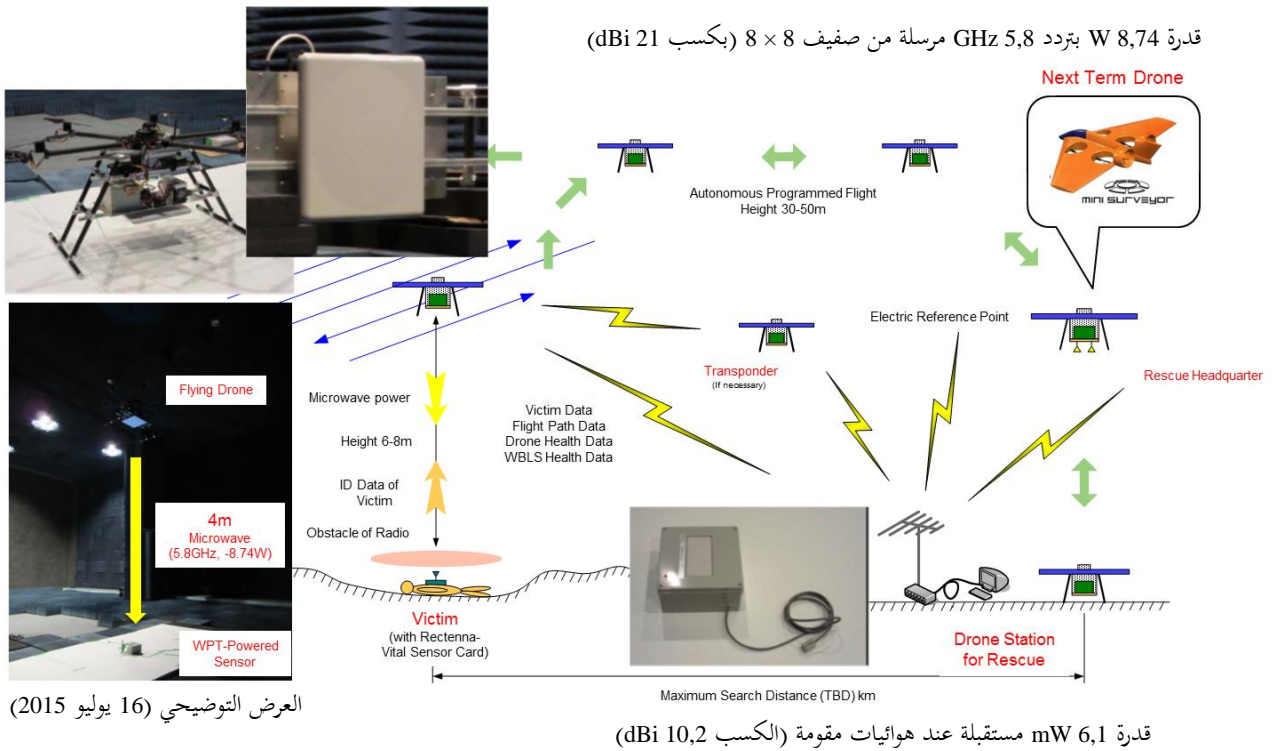
وتوفر شركة يابانية جهاز استشعار لاسلكي تجاري باستخدام التكنولوجيا WPT في النطاق 920 MHz [DEN 13]. وتقل مسافة التطبيق عن 5 m. وتبلغ كفاءة التحويل RF-DC نحو 60% تقريباً. وتقدم الشركة تطبيقات لجهاز الاستشعار اللاسلكي من أجل الاستشعار في درجات الحرارة المرتفعة (85-120°) والاستشعار من فوق جسم دوار أو متحرك والاستشعار في البيئات القاسية؛ مثل الاستشعار خارج المباني وفي البيئات البحرية وما إلى ذلك. وقد طورت الشركة هوائي عالي الكفاءة تبلغ كفاءة التحويل RF-DC فيه 91,6% تقريباً عند قدرة 8 W وتردد 2,45 GHz وقدرة 7 W [FUR 13].

واقترح في اليابان في 2015 تطبيق لجهاز استشعار لاسلكي باستخدام طائرة بدون طيار محلقة في السماء. ومن نقاط ضعف التكنولوجيا WPT فقدان التوائم بين القدرة المطلوبة وحجم النظام في هذه التكنولوجيا والذي يشمل حجم الهوائي وقدرة الموجة الراديوية الناقلة. وعندما تزيد المسافة بين الهوائي الإرسال والاستقبال في التكنولوجيا WPT، تنخفض كفاءة الحزمة بشكل أكبر من

توقعات المستعمل. حتى بالنسبة لجهاز استشعار التكنولوجيا WPT، يحدث هذا الأمر في بعض الأوقات. وباستعمال الطائرة بدون طيار المحلقة تصبح المسافة بين الهوائيين أقصر ويمكن للنظام WPT أن يكون أصغر مقارنةً بالأمر في حالة عدم وجود الطائرة بدون طيار. ويطلق على النظام WPT المقترح اسم "نظام الاستشعار اللاسلكي بدون بطارية المدعوم بالطائرات دون طيار (WBLs)". وقد أجريت التجربة الأولى في يوليو 2015 في جامعة كيوتو بواسطة WiPoT وجامعة كيوتو واتحاد Mini-Surveyor وشركة مختبرات أنظمة التحكم المستقلة المحدودة. وتم إرسال قدرة موجات صغيرة بالتردد 5,8 GHz والقدرة 8,74 W من هوائي صفيحي  $8 \times 8$  (كسب 21 dBi) من فوق طائرة بدون طيار محلقة (multicopter)، كما هو مبين في الشكل 3.1.2. وقامت القدرة المستقبلية والتي بلغت 6,1 mW من التيار المستمر بعد التقويم بتشغيل جهاز استشعار. وتشمل التطبيقات الواعدة للنظام WBLs المدعوم بالطائرات دون طيار إنقاذ الضحايا وتزويد أجهزة الاستشعار بنقل الطاقة لاسلكياً في البراكين وفي عمليات معاينة البنى التحتية (الجسور والأنفاق) وما إلى ذلك.

### الشكل 3.1.2

#### مفهوم النظام WBLs المدعوم بطائرة بدون طيار والعرض التوضيحي الخاص به في يوليو 2015 في اليابان



[ICH 12] Ichihara, T., T. Mitani, and N. Shinohara, "Study on Intermittent Microwave Power Transmission to a ZigBee Device", Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012), pp. 209-212, 2012.

[ITU 10] متطلبات لدعم تطبيقات شبكات المحاسيس الشمولية (USN) وخدماتها في بيئة شبكات الجيل التالي التوصية ITU-T Y.2221 (2010).

[ITU 14] تطبيقات شبكات الاستشعار اللاسلكية في شبكات الجيل التالي، الورقة التقنية ITU-T Y.2000 (2014).

[DEN 13] DENGYO Corporation [http://www.den-gyo.com/solution/solution10\\_b.html](http://www.den-gyo.com/solution/solution10_b.html) (in Japanese).

[FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, "Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for

Electric Trucks Application (in Japanese)", IEICE Technical Report, WPT2012-7, pp. 36-39, 2013.

- [MAE 13] Maehara, D., R. Akai, G.K. Tran, K. Sakaguchi, S. Sampei, K. Araki, and H. Iwai, "Experiment on Battery-less Sensor Activation via Multi-point Wireless Energy Transmission", Proc. of 2013 IEEE 24th Annual Int. Sympo. On Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 2346-2350, 2013.
- [SAK 10] Sakaguchi, K., R.P. Wicaksono, K. Mizutani, and T. Khanh, "Wireless Grid to Realize Ubiquitous Networks with Wireless Energy Supply (in Japanese)", IEICE Tech. Report, Vol. 109, No. 442.

## 2.2 شاحن لاسلكي للأجهزة المتنقلة (معرف هوية التطبيق: a2)

### 1.2.2 الوضع في اليابان

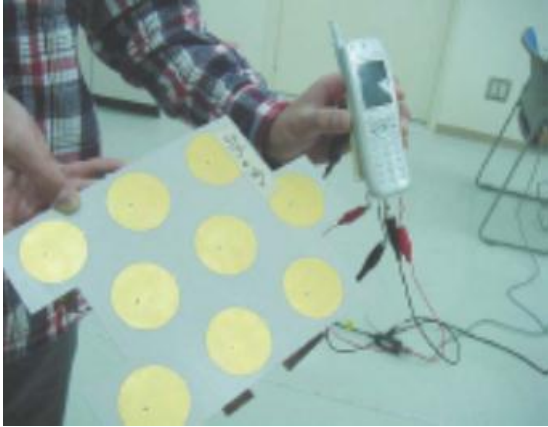
تعتبر أجهزة الاستشعار مناسبة للاستفادة من الإرسال اللاسلكي للقدرة عبر الموجات الراديوية لأنها أجهزة بالغة الانخفاض في استهلاك الطاقة. ومع ذلك، هناك أنواع متعددة من الأجهزة المتنقلة التي تعمل باستخدام تخزين الطاقة في البطاريات وينبغي أن تطبق فيها التكنولوجيا WPT من أجل التغذية بالقدرة لاسلكياً أو الشحن اللاسلكي لهذه الأجهزة المتنقلة المتنوعة. ولهذا الغرض اقترح مفهوم أطلق عليه مصدر الطاقة الشمولي (UPS) بالقرب من نهايات تسعينيات القرن الماضي [SHI 04] [SHI 05] ويستند إلى وجود الموجات الصغرية في كل مكان وفي جميع الأوقات (شمولية) وأنها متاحة دائماً من أجل التكنولوجيا (WPT).

ويعرض مفهوم المصدر (UPS) في الشكل 1.2.2 (أ). وترسل قدرة الموجات الصغرية في النطاق GHz 2,45 (ترددات نطاقات الخدمات الصناعية والعلمية والطبية (ISM) الواقعة في المدى GHz 2,50-2,40) من حواف أي سقف لشحن الهواتف المحمولة. ويمكن إلى حد كبير إنتاج كثافة منتظمة لقدرة الموجات الصغرية في أي قاعة من قاعة مصدر الطاقة UPS بحيث تنصب الهوائيات على حواف السقف. ويتم اختيار الهوائيات الشقية كهوائيات إرسال لانخفاض تكلفتها. ولهذا السبب، يستعمل جهاز ماغنترون مستقر ترددياً ويمكن التحكم في طوره. بيد أنه نظراً إلى أن مفهوم المصدر UPS يقوم على "مصدر لاسلكي للطاقة في جميع الأوقات وجميع الأماكن"، يقيد تصميم المصدر UPS بقضايا السلامة المرتبطة بتعرض الكائنات البشرية للموجات الصغرية لفترات طويلة. ويضبط مستوى السلامة على أقل من  $1 \text{ cm}^2/\text{mW}$  فيما يتعلق بالتعرض المستمر على كامل جسم الإنسان. وبالنسبة لقاعة تجارب أبعادها  $4,3 \times 5,8 \text{ m}$ ، ترسل قدرة موجات صغرية مقدارها 150 W تقريباً من الماغنترون لإنتاج كثافة منتظمة لقدرة الموجات الصغرية تساوي أو تقل عن  $1 \text{ cm}^2/\text{mW}$ . ومن الضروري وجود هوائيات مقومة عالية الكفاءة أيضاً للتشغيل على كثافة موجات صغرية تساوي أو تقل عن  $1 \text{ cm}^2/\text{mW}$ . وفي ظل هذه الشروط، كانت التجربة ناجحة فيما يتعلق بشحن الهواتف المحمولة، كما هو مبين في الشكل 1.2.2 (ب). وعلاوة على ذلك، يمكن الاستمرار في استعمال أي هاتف محمول داخل قاعة المصدر UPS نظراً إلى الاختلاف بين قدرة الموجات الصغرية في النطاق GHz 2,45 وترددات أنظمة الاتصالات في النطاق GHz 1,9.

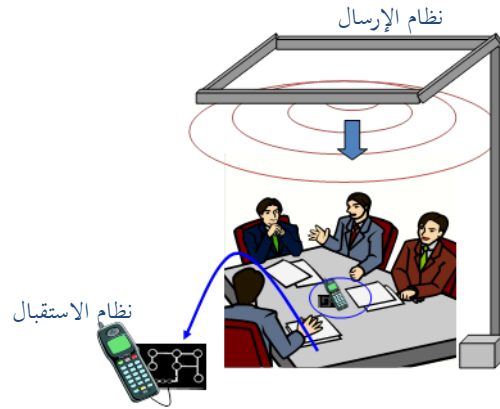


## الشكل 1.2.2

(ب) تجربة شحن هاتف محمول لاسلكياً باستخدام  
المصدر UPS [SHI 04]



(أ) مفهوم "مصدر الطاقة الشمولي"

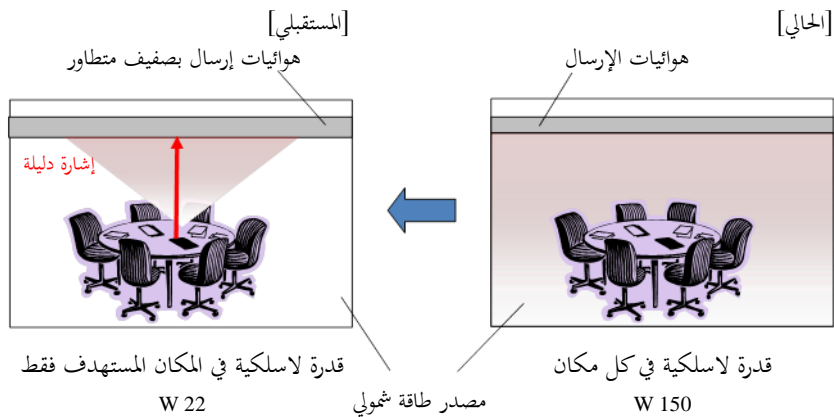


وكامتداد للأنظمة UPS، ينبغي استخدام صفيق متطور لخفض القدرة الإجمالية المرسله والإشعاعات غير المتوقعة في الأماكن التي لا تكون هناك حاجة فيها إلى القدرة (الشكل 2.2.2). وبالنسبة لمصدر UPS اتجاهي في قاعة تساوي مساحتها قاعة تجربة المصدر UPS الموضحة أعلاه، لن تكون هناك حاجة إلا إلى 22 W فقط من قدرة الموجات الصغيرة (مقابل 150 W بالنسبة للنظام UPS التقليدي) إذا كان يعين توليد كثافة قدرة حول الجهاز مقدارها 1 cm<sup>2</sup>/mW. ولا يزال الصفيق المتطور باهظ التكلفة بالنسبة للتكنولوجيا WPT والأنظمة UPS من المنظور التجاري. وتعتمد تكلفة الصفيق المتطور على تكاليف المكونات، لا سيما مزحزح الطور.

لذا، يقترح تصميم أنظمة بدون مزحزحات الطور لخفض قدرة الموجات الصغيرة الإجمالية بالنسبة للنظام UPS مع خفض التكلفة في نفس الوقت [HAS 11].

## الشكل 2.2.2

مصدر UPS حالي مقابل مصدر UPS مستقبلي باستخدام صفيق متطور

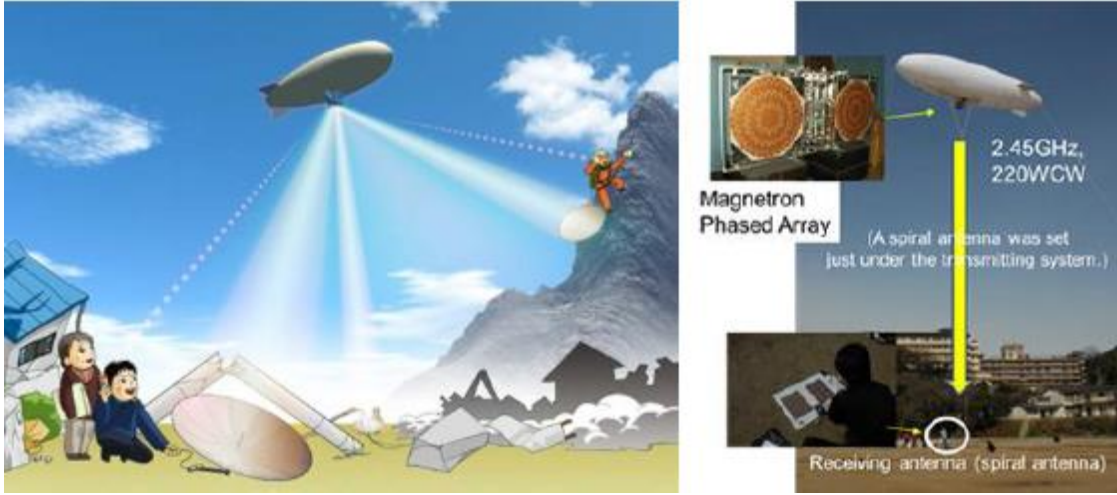


واقترح المصدر UPS الخاص بحالات الطوارئ وأجريت له تجربة في 2009 في اليابان [MIT 10]، على نحو ما ورد في القسم 4.2. وتعرض صورة للنظام التجريبي في الشكل 3.2.2. وهناك بعض المشاريع البحثية في جميع أنحاء العالم تضم محطات قاعدة للطوارئ من أجل الهواتف المحمولة تحمل على متن بالون أو مركبة جوية. ومع ذلك، فإنه في حالة أي محطة قاعدة خاصة بهواتف محمولة تنشأ لحالات الطوارئ، فإنه لا يمكن استعمال أي هاتف محمول بدون كهرباء. لذا، يقترح بالنسبة لأي نظام UPS لحالات الطوارئ

أن يتسنى استعادته سريعاً أو بصورة دورية بالكهرباء من خلال الطاقة اللاسلكية. وفي تجربة عام 2009، تم شحن هاتف محمول باستعمال طاقة لاسلكية من مركبة جوية فقط.

### الشكل 3.2.2

#### صورة النظام UPS لحالات الطوارئ وصورة للتجربة (2009)



#### 2.2.2 الوضع في الولايات المتحدة

في مؤتمر التكنولوجيا Tech Crunch Disrupt لعام 2013، اقترحت شركة مقرها الولايات المتحدة شاحناً لاسلكياً تجارياً للهواتف المحمولة باستعمال التكنولوجيا MPT التي يساوي ترددها تردد التكنولوجيا WiFi [AOL 13]. ويطلق على الشاحن اسم "Cota" ويمكنه أن يوفر قدرة مقدارها 1 W لاسلكياً لمسافة تصل إلى 30 قدماً. وعرضت الشركة في المؤتمر هاتفاً iPhone 5 يتم شحنه عن بُعد من نظام WPT تجريبي. وأعلنت الشركة أن الشاحن التجاري Cota سيكون جاهزاً في العام 2013-2014 وأن الشاحن الاستهلاكي منه سيكون جاهزاً للطرح قبل عام 2015. وبدأت شركة أمريكية أخرى في إنتاج شاحن لاسلكي للهواتف المحمولة يطلق عليه اسم "Wattup" في 2015. وتستعمل الشركة ترددتين؛ 2,4 GHz (غير المرخص) من أجل الاتصالات منخفضة الطاقة بتقنية Bluetooth والنطاق 5,7-5,8 GHz (نطاق الخدمات الصناعية والعلمية والطبية غير المرخص) من أجل نقل الطاقة.

[AOL 13] Aol Tech. <http://techcrunch.com/2013/09/09/cota-by-ossia-wireless-power/>.

[HAS 11] Hashimoto, K., T. Ishikawa, T. Mitani, and N. Shinohara, "Improvement of a ubiquitous power source", *Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2011*, CD-ROM CHGBDJK-1.pdf, 2011.

[MIT 10] Mitani, T., H. Yamakawa, N. Shinohara, K. Hashimoto, S. Kawasaki, F. Takahashi, H. Yonekura, T. Hirano, T. Fujiwara, K. Nagano, H. Ueda, and M. Ando, "Demonstration Experiment of Microwave Power and Information Transmission from an Airship", *Proc. of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Radio System and Space Plasma 2010*, pp. 157-160, 2010.

[SHI 04] Shinohara, N., H. Matsumoto, T. Mitani, H. Shibata, T. Adachi, K. Okada, K. Tomita, and K. Shinoda, "Experimental Study on "Wireless power Space" (in Japanese), *IEICE Tech. Report*, SPS2003-18, pp. 47-53, 2004.

[SHI 05] Shinohara, N., T. Mitani, and H. Matsumoto, "Study on Ubiquitous Power Source with Microwave Power Transmission", *Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2005*, CD-ROM C07.5(01145).pdf, 2005.

## 3.2 صفائح نقل الطاقة لاسلكياً (معرف هوية التطبيق: b1)

## 1.3.2 الوضع في اليابان

من شأن وجود نظام MPT يعمل عبر أدلة موجية مغلقة أن يكون بمثابة تطبيق محتمل جيد في ظل اللوائح الحالية للموجات الراديوية. وقد اقترح وطور نظام MPT آخر يعمل عبر الأدلة الموجية المغلقة في اليابان. ويطلق على هذا النظام اسم "نظام إرسال الطاقة بدليل موجي ثنائي الأبعاد (2DWPT) أو النظام السطحي للنقل اللاسلكي للطاقة" [SHD 07]. وفي الأنظمة 2DWPT، تنتشر الموجات الصغيرة عبر صفيحة دليل موجي وتستقبل انتقائياً بأجهزة استقبال خاصة على صفائح (الشكل 1.3.2). وللنظام 2DWPT أيضاً مواءمة لا مفر منها بين السلامة وسعة إرسال الطاقة. ويوضح الشكلان 2.3.2 (أ) و 2.3.2 (ب) سطح دليل موجي محسن أثبت إمكانية تحسين أداء التوافق الكهرومغناطيسي (EMC) [NOD 11] و [NOD 12]. وتستقبل الموجات الصغيرة على مقرون رنان حلقة دليل موجي (WRR) يستخلص الطاقة من الدليل الموجي عبر عازل سميك (الشكل 2.3.2 (ج)). ولا تتعرض الأجسام الخارجية القريبة من الصفيحة أو حتى الملامسة لها لمجالات كهرومغناطيسية قوية. وللمقرن WRR عامل جودة عال جداً في حالة الرنين وهو أمر أساسي لدعم الإرسال الانتقائي للطاقة. ويوصل المقرن WRR بدارة تقويم تشق من الصنف F. وقد بلغت الكفاءة الإجمالية المعرفة بالنسبة بين خرج التيار المستمر لمقرن التقويم ودخل الموجات الصغيرة إلى الصفيحة 40,4% كحد أقصى حيث كان دخل الموجات الصغيرة W 1 في النطاق GHz 2,4 مع مقرن بمساحة  $3,6 \times 6,4 \text{ cm}^2$  على صفيحة بمساحة  $39 \times 56 \text{ cm}^2$  (100 مرة من مساحة المقرن تقريباً) [NOD 12].

## الشكل 1.3.2

## صورة للنظام 2DWPT



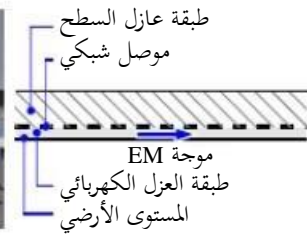
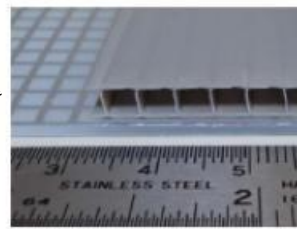
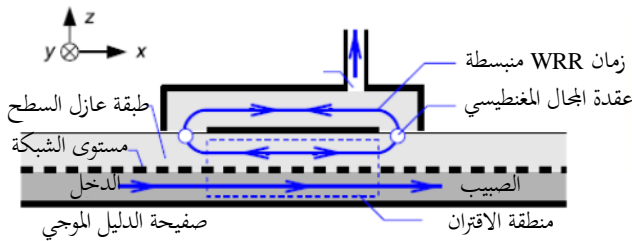
## الشكل 2.3.2

## صفيحة نقل للطاقة لاسلكياً

(ج) مستقبل الطاقة اللاسلكية [NOD 11] [NOD 12]

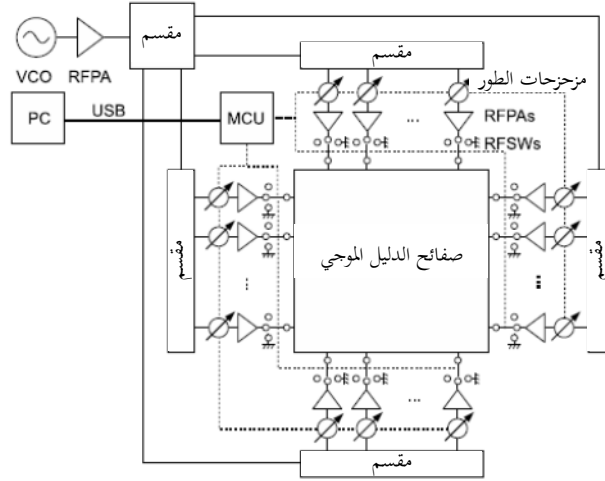
(ب) رسم مخططي للمقطع العرضي للصفيحة

(أ) منظر علوي لصفيحة الدليل الموجي حول حافتها



الشكل 3.3.2

مخطط وظيفي لنظام إمداد بطاقة الموجات الصغيرة باستخدام صفيق مطاور  
يضم سبعة مكبرات RF عبر حافته [NOD 13]



وتستخدم الموجات الصغيرة في النظام 2DWPT وتنتشر طبقاً لمعادلات ماكسويل حتى إذا تقلصت الأبعاد من ثلاثة إلى اثنين. ولاستبعاد الإشعاعات غير المتوقعة، يمكن استخدام صفيق مطاور في النظام 2DWPT وهو ما يكافئ النظام 3DWPT [NOD 13]. ويعرض الشكل 3.3.2 نظاماً 2DWPT تجريبياً مقترحاً باستخدام صفيق مطاور، وذلك في جامعة طوكيو. وأظهرت نتائج التجربة أن التغيير في الكفاءة عند أي نقطة استقبال على الصفيحة التي تستخدم الصفيق المطاور تم كبحه وتقييده في حدود 2 dB بينما كان التغيير أكثر من 10 dB بدون نظام الصفيق المطاور.

وخضع النظام 2DWPT للتقييم في رابطة الصناعات ومشاريع الأعمال الراديوية (ARIB) وصدر في صورة المعيار ARIB STD-T113 [ARI15]. ويبلغ التردد 2,498 MHz  $\pm$  1 GHz وتقل القدرة عن 30 W.

- [ARI15] ARIB STD-T113 [http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T113v1\\_0.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T113v1_0.pdf) (in Japanese).
- [NOD 11] Noda, A., and H. Shinoda, "Selective wireless power transmission through high-Q flat waveguide-ring resonator on 2-D waveguide sheet," *IEEE Trans. MTT*, Vol. 59, No. 8, pp. 2158-2167, 2011.
- [NOD 12] Noda, A., and H. Shinoda, "Waveguide-Ring Resonator Coupler with Class-F Rectifier for 2-D Waveguide Power Transmission", *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 259-262, 2012.
- [NOD 13] Noda, A., and H. Shinoda, "A Phased Array Feeding System for 2-D Waveguide Power Transmission (in Japanese)", *Proc. of IEICE*, BSC-1-8, March 2013.
- [SHD 07] Shinoda, H., Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, "Surface sensor network using inductive signal transmission layer," *Proc. of Int. Conf. on Networked Sensing Systems (INSS) 2007*, pp. 201-206, 2007.

4.2 نقل طاقة الموجات الصغيرة (MPT) في أنابيب (معرف هوية التطبيق: b2)

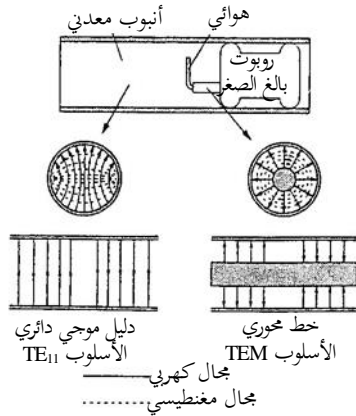
1.4.2 الوضع في اليابان

في تسعينيات القرن الماضي في اليابان، تم تطوير روبوت بالغ الصغر يتحرك داخل أنبوب ويتم تشغيله بتوصيل الطاقة إليه عبر الموجات الصغيرة. ويعرض المفهوم في الشكل 1.4.2 (أ). والنظام MPT عبارة عن نظام أنبوبي طور في الموجات الصغيرة 14 GHz

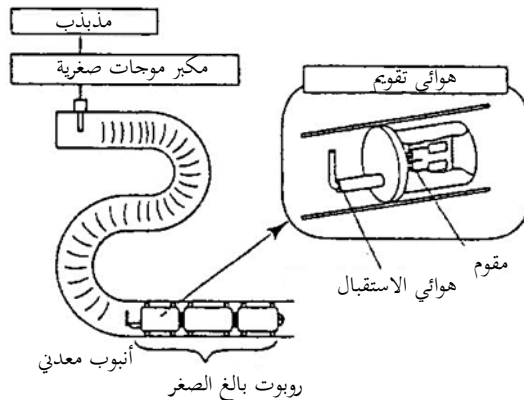
كما هو مبين في الشكل 1.4.4 (ب) [SHB 97]، والتي تنتشر عبر أنبوب دائري قطره 15 mm، كدليل  $TE_{11}$  (الشكل 1.4.2 (ب)) مع خسارة إرسال تقدر بأقل من 1 dB/m. ويقوم هوائي تقويم مؤلف من هوائي أحادي القطب ودارة تقويم باستقبال قدرة الموجات الصغيرة ويغذى بالقدرة DC المقومة نظام الإدارة الداخلي للروبوت والمؤلف من خلية ثنائية كهروضغوية لتشغيل الروبوت. وقد يستقبل الروبوت بالغ الصغر قدرة موجات صغيرة بلغت 50 mW وتسنى له التحرك بسرعة 1 mm/sec في الأنبوب عند نقل قدرة موجات صغيرة قدرها 1 W عبر الأنبوب.

### الشكل 1.4.2

(ب) طريقة تقليدية لتحويل القدرة من دليل موجي دائري إلى كبل محوري [SHB 97]



(أ) مفهوم روبوت داخل أنبوب يشغل بالتكنولوجيا MPT



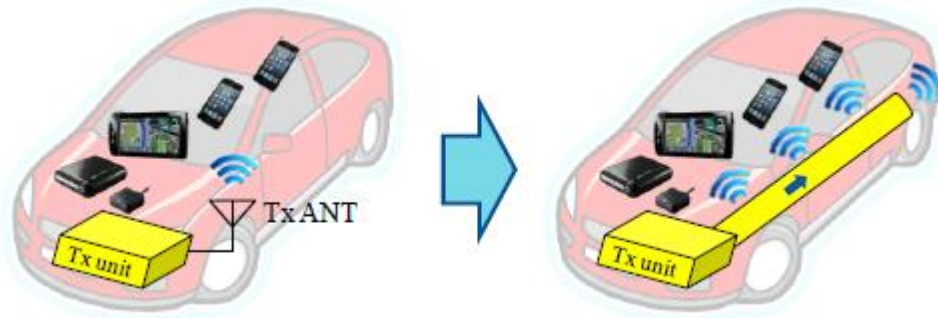
وفي تسعينيات القرن الماضي، اقترح في اليابان نظام MPT لتشغيل روبوت مراقبة في أنبوب غاز [HIR 97] [HIR 99]. وكان قطر أنبوب الغاز 155 mm تقريباً، وهو ما اعتبر مناسباً لانتشار الموجات الصغيرة العاملة في التردد 2,45 GHz. وتمثلت المشكلات المرتبطة بهذا التطبيق MPT الخاص في (1) خسارة انتشار غير معلومة في أنابيب الغاز التي يعترضها الصداً و(2) التوزيع المعقد لشبكة أنابيب الغاز. وقد درت خسارة الانتشار عملياً ونظرياً وكان في حدود 0,1- إلى 1,0 dB/m. وخلص إلى أن الخسارة منخفضة بما يكفي لانتشار قدرة الموجات الصغيرة في أنبوب الغاز.

وطرح التعقيد في شبكة تفرغ الأنبوب مشكلة أكبر. ونظرياً، لا يمكن للموجات الراديوية الانتشار في جميع فروع الدليل الموجي، حيث لن تخدم بعض الفروع بالموجات الراديوية. وقد دعمت نتائج التجارب هذه النظرية وهو ما أشار إلى أن النظام MPT المقترح في نظام أنابيب تطبيق محدود.

وقد اقترح وطور خرطوم جديد للموجات الراديوية من أجل تطبيق WPT في عام 2015 في اليابان [ISH15-1] [ISH15-2]. وقد تم طلاء خرطوم الموجات الراديوية ومعالجته وتحويله إلى خرطوم راتنج بطلاء موصل. وتم إنشاء نظام تحريبي للإرسال اللاسلكي للطاقة باستخدام خرطوم الموجات الراديوية، أكد على إمكانية لإرسال اللاسلكي للطاقة من الصنف 100-mW في النطاق 5,8 GHz. وسيستخدم خرطوم الموجات الراديوية في السيارات التي لا تتضمن شبكات أسلاك كما هو مبين في الشكل 2.4.2.

## الشكل 2.4.2

مفهوم سيارة بدون شبكة أسلاك مزودة بخرطوم موجات راديوية للإرسال اللاسلكي للطاقة عبر أنبوب [ISH15-1]



- [HIR 97] Hirayama, K., N. Shinohara, K. Hashimoto, H. Matsumoto, T. Nakauchi, and Y. Yoshida, "Fundamental Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (in Japanese)", *Proc. of IEICE Comm.*, p. 116, March 1997.
- [HIR 99] Hirayama, K., N. Shinohara, H. Matsumoto, and I. Nagano, "Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (in Japanese)", *Proc. of IEICE Comm.*, p. 25, March 1999.
- [IHI15-1] Ishino, S., A. Kishimoto, Y. Takimoto, Y. Arai, Y. Huang, and N. Shinohara, "Study on WPT System Using a Radio Wave Hose as a New Transmission Line", *Proc. of 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc2015)*, P4.1, May 2015.
- [ISH 15-2] Ishino, S., T. Miyagawa, and N. Shinohara, "A New Slotted Waveguide Using a Resin Hose with Metallic Coating", *Proc. of 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Dec. 2015.
- [SHB 97] Shibata, T., Y. Aoki, M. Otsuka, T. Idogaki, and T. Hattori, "Microwave Energy Transmission System for Microrobot", *IEICE Trans. Electr.*, Vol.E80-C, No. 2, pp. 303-308, 1997.

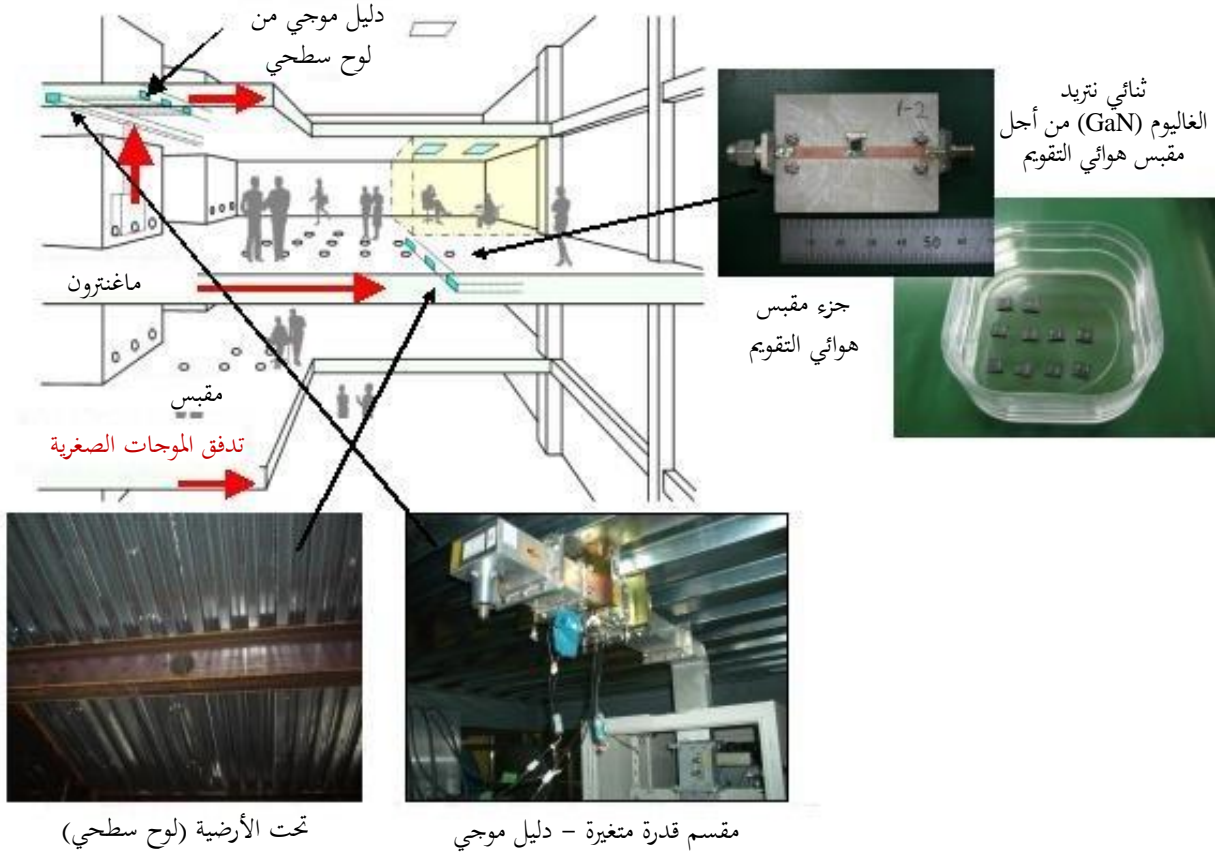
## 5.2 مباني الموجات الصغرية (معرف هوية التطبيق: b3)

### 1.5.2 الوضع في اليابان

اقترحت شركة بناء يابانية بالاشتراك مع جامعة كيوتو مبني لاسلكياً باستخدام تكنولوجيا قدرة الموجات الصغرية [SHI 14]. ويعرض نظام الطاقة المقترح في الشكل 1.5.2. ويوفر هذا النظام الإمداد بالطاقة الكهربائية لاسلكياً باستخدام لوح سطحي يتألف من ألواح سطحية إضافية تعمل كأدلة موجية لإرسال طاقة الموجات الصغرية. وتم اختيار التردد 2,45 GHz على أساس قيود الحجم بالنسبة للألواح السطحية التقليدية وقد استخدم ماغنترون كمرسل للموجات الصغرية لخفض التكلفة وتسهيل التحكم في تدفق قدرة الموجات الصغرية بمقسّات قدرة متغيرة لا توصل قدرة الموجات الصغرية إلى المستعملين الذين يحتاجون إليه مع حجب التدفق عن الأماكن التي لا يوجد بها مستعملين. ووضع تحت الأرضية هوائيات تقوم كمحولات DC ومصادر للطاقة DC. وكان ضبط موقع الهوائيات سهلاً إلى حدٍ كبير لوجود الموجات الصغرية في كل مكان تحت الأرضية بوجهٍ خاص. قد افترض أن الكفاءة الإجمالية من تحويل الكهرباء إلى تيار مستمر عبر النقل من خلال الموجات الصغرية تساوي 50%. وبالرغم من أن تكاليف التشغيل اليومية للكهرباء في نظام بناء بالموجات الصغرية تساوي ضعف هذه التكاليف بالنسبة لمبني تقليدي بشبكة أسلاك، فإن التكاليف الأولية للمبني تنخفض نتيجةً لانخفاض تكاليف البناء. وبالتالي، قدر أنه يمكن خفض التكاليف الإجمالية لدورة حياة المبني باستخدام نظام البناء بالموجات الصغرية.

## الشكل 1.5.2

## مبنى لاسلكي باستخدام إرسال الطاقة بالموجات الصغيرة



وفي المرحلة الأولى، تم النظر في النظام اللاسلكي من أجل المباني المكتبية حيث تستخدم بشكل رئيس الحواسيب التي تشغل بالتيار DC وغيرها من المعدات OA. ويقدر أن المحول DC الواحد يحتاج إلى أقل من 50 W، وأنه يتم الإمداد بقدرة موجات صغيرة يزيد مقدارها عن 3 kW للغرفة الواحدة، وهو ما يبين أن النظام يوفر ما يكفي من طاقة لتشغيل عدد من الأجهزة الكهربائية النمطية في كل غرفة. وتعمل الموجات الصغيرة المسافرة عبر الدليل الموجي في هذا التطبيق كنظام للإمداد المستمر بالطاقة (UPS).

- [SHI 14] Shinohara, N., N. Niwa, K. Takagi, K. Hamamoto, S. Ujigawa, J.-P. Ao, and Y. Ohno, "Microwave Building as an Application of Wireless Power Transfer", Wireless Power Transfer, pp. 1-9, 2014.4.
- [TAK 09] Takahashi, K., J.-P. Ao, Y. Ikawa, C.-Y. Hu, H. Kawai, N. Shinohara, N. Niwa, and Y. Ohno, "GaN Schottky Diodes for Microwave Power Rectification", *Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)*, Vol. 48, No. 4, pp. 04C095-1 - 04C095-4, 2009.

## 6.2 الإرسال اللاسلكي للطاقة إلى أهداف متحركة/طائرة (معرف هوية التطبيق: c1)

## 1.6.2 الوضع في كندا

يعتبر الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية مناسباً من أجل الإرسال اللاسلكي للطاقة إلى هدف متحرك/طائر. وقد أجرى فريق كندي تابع لمركز بحوث الاتصالات (CRC) بنجاح تجربة لطيران طائرة بدون وقود باستخدام التكنولوجيا MPT عام 1987، أطلق عليها اسم منصة الترحيل الثابتة عالية الارتفاع (SHARP)؛ (الشكل 1.6.2) [SCH 88] [SHA 88]. وقد تم إرسال إشارة موجات صغيرة بتردد 2,45 GHz وبقدرة قيمتها 10 kW إلى نموذج طائرة يبلغ إجمالي طولها 2,9 m وعرض جناحها 4,5 m، وقد قامت بالطيران على ارتفاع يزيد عن 150 m فوق مستوى سطح الأرض.

## 2.6.2 الوضع في اليابان

نجحت في اليابان عام 1992 تجارب لطيران طائرة بدون وقود بصفيف مطاور مع التكنولوجيا MPT تعمل على التردد 2,411 GHz لمشروع MILAX (الشكل 2.6.2) [MAT 93]. وكانت هذه التجربة هي الأولى في العالم باستخدام تشكيل الحزم بالصفيف المطاور. وكان الهدف من تجارب التكنولوجيا MPT التي أجريت خلال المشروعين SHARP و MILAX إقامة منصة ترحيل ثابتة عالية الارتفاع في طبقة الاستراتوسفير.

### الشكل 1.6.2

تجربة طيران المنصة SHARP الكندية ونموذج الطائرة بالمقياس 1/8 في 1987 [SHA 88]



### الشكل 2.6.2

تجربة طائرة المشروع MILAX التي تعرض نموذج الطائرة والصفيف المطاور المستخدمين في اليابان في 1992



وفي بواكير القرن الحادي والعشرين، تم في اليابان اقتراح وتطوير إرسال الطاقة بالموجات الصغيرة إلى مشروع المركبة الجوية بالغة الصغر (MAV) [MYS 12] وطائرة المراقبة [NAG 11] [NAG 12] وكانا نظامين لنقل الطاقة بالموجات الصغيرة موجّهين إلى الطائرات الصغيرة (الشكل 3.6.2). وكانت جامعة طوكيو هي التي اقترحت نقل الطاقة بالموجات الصغيرة إلى المركبة MAV. وقد تمكن الباحثون من إرسال قدرة موجات صغيرة بالتردد 5,8 GHz إلى مركبة MAV طائرة تم منها إرسال إشارة دليلية بتردد 2,45 GHz كإشارة للكشف عن الأهداف. وقد تم تركيب هوائي تقويم على بدن المركبة MAV. واستخدم في البداية

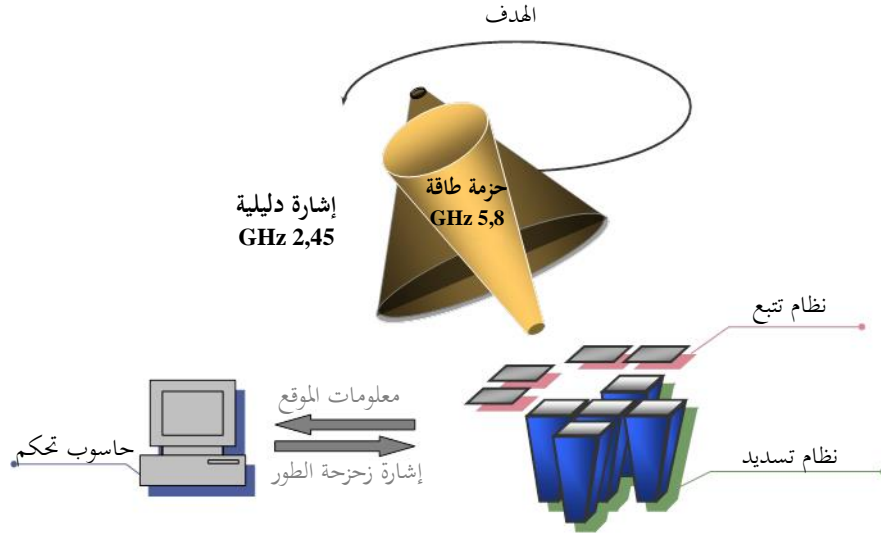


5 هوائيات بوقية كصيف مطاور. وكان قطر الصيف mm 330 والمسافة بين عناصره  $\lambda/2$ . وكانت قدرة الموجات الصغرية الصادرة عن كل هوائي بوقي W 4.

وبالنسبة للنظام الأساسي، اعتمد صيف مطاور باستخدام 8 من هوائيات الشرائح الصغرية كانت المباعدة بين عناصر  $\lambda/1,36$ . وبلغت قدرة الموجات الصغرية الصادرة عن كل هوائي شرائح صغرية W 8.

### الشكل 3.6.2

أول مفهوم لعملية لإرسال الطاقة بالموجات الصغرية لمركبة جوية بالغة الصغر [MYS 12]



### الشكل 4.6.2

وصف لعملية نقل الطاقة بالموجات الصغرية إلى طائرة المراقبة لكوكب المريخ [NAG 12] [NAG 11]

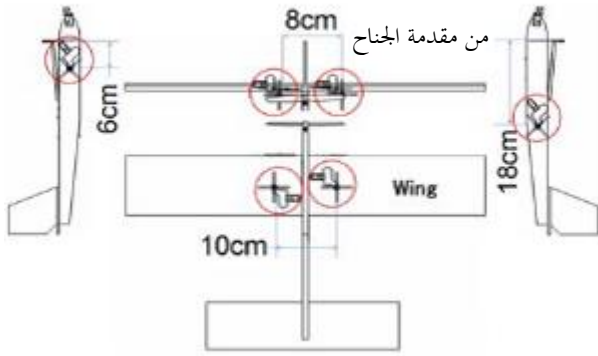


وقد قدمت المقترح الخاص بنظام طائرة المراقبة بالموجات الصغرية لكوكب المريخ جامعة كيوتو ومعهد كيوسيو للتكنولوجيا في اليابان. وتتسم المراقبة المستمرة على مدى واسعة لسطح كوكب المريخ بالأهمية من أجل فهم الخواص الفيزيائية للكوكب؟ ويراقب سطح كوكب المريخ بشكل أساسي بواسطة عربة طوافة لا تستطيع التحرك بسرعة ولا مراقبة المناطق الوعرة. من هنا، لاقت طائرة المراقبة الصغرية الاهتمام كبديل للعربة الطوافة. ولتحقيق طيران مستقر في الجو المنخفض كثيراً للمريخ، يجب خفض وزن الطائرة.

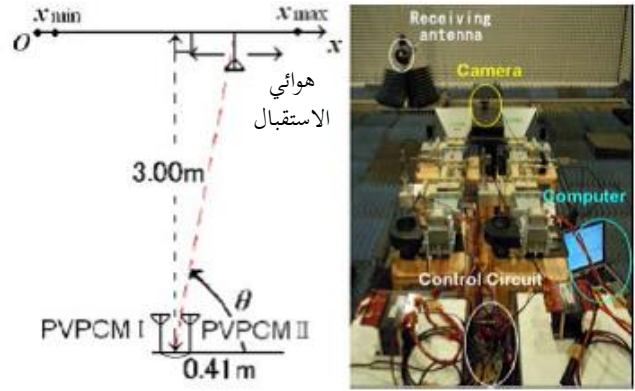
وتعتبر عملية نقل الطاقة بالموجات الصغيرة تكنولوجيا ممتازة يمكن استخدامها لخفض الاحتياجات من الوقود في الطائرة، بل وربما الاستغناء عنه تماماً. ويعرض في الشكل 4.6.2 وصف لطائرة مراقبة مستقبلية محتملة للمريخ [NAG 11] [NAG 12]. وتعرض في الشكل 5.6.2 تشكيلة تجريبية. وقد استخدم في التجربة نظام MPT يستعمل هوائي صفيحي مطاوير يتألف من "ماغنترونات متغيرة القدرة تخضع للتحكم في الطور (PVPCM)" والتكنولوجيا PVPCM عبارة عن تكنولوجيا مشتقة من تكنولوجيا الماغنترونات الذي يخضع للتحكم في الطور (PCM) والتي طورت في جامعة كيوتو. ويمكن للماغنترونات PVPCM إرسال قدرة موجات صغيرة بالتردد 2,45 GHz ومقدار 61 dBm ويمكنه التحكم في اتجاه الحزمة باستخدام التحكم في الطور [NAG 11]. ويتتبع المرسل موقع الطائرة بكاميرا باستعمال تطبيق معالجة الصورة [NAG 12].

### الشكل 5.6.2

(ب) التوزيع المنسق لهوائيات التقييم الستة على بدن الطائرة من أجل التجارب الأرضية [NAG 12]



(أ) رسم تخطيطي وصورة لصفيف مطاوير قائم على الماغنترونات



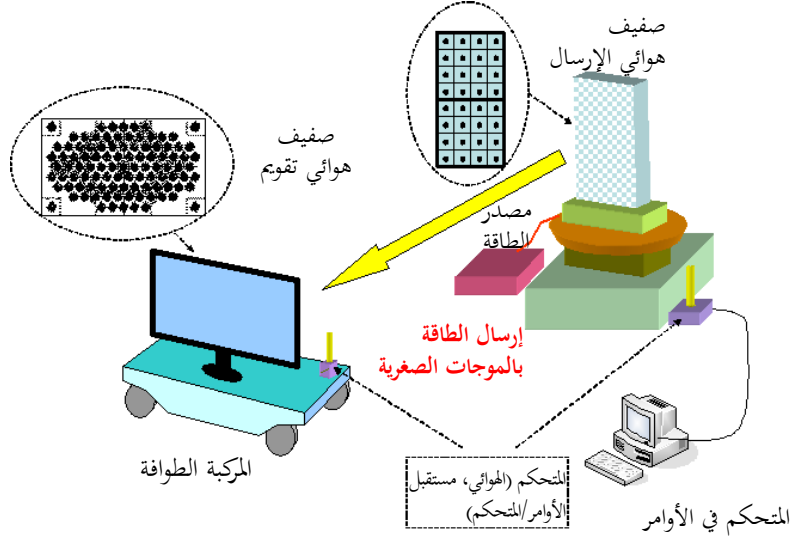
ويعد نقل الطاقة بالموجات الصغيرة إلى عربة طوافة متحركة تطبيقاً محتملاً آخر كما هو مبين في الشكل 6.6.2. ومنذ عام 2004، تم في اليابان تطوير عملية لنقل الطاقة بالموجات الصغيرة باستخدام تكنولوجيا الهوائي المدمج النشط (AIA) [SHI 07]. وتمثلت أهداف هذا المشروع في (1) تطوير مرسل للطاقة بالموجات الصغيرة ذي نسبة بالغة الصغر للقدرة إلى الوزن وذلك باستخدام التكنولوجيا AIA (مع هدف أقل من 50 g/W)، و(2) تحسين إدارة القدرة بالنسبة لطاقة الموجات الصغيرة المقومة عند الهوائي والمستقبل ومقوم طاقة الموجات الصغيرة، خاصة التغييرات في الحمل الموصول، و(3) تجارب أساسية للتعايش بين موجات صغيرة بقدرة 100 W وموجات اتصالات لاسلكية بقدرة 10 mW. وفيما يتعلق بالمستهدف من المشروع، تم اختيار نقل الطاقة بالموجات الصغيرة إلى عربة طوافة متحركة. وتكون النظام الفرعي لإرسال الموجات الصغيرة من هوائي AIA من 32 عنصراً ذي صفيح من هوائيات الشرائح الصغيرة المستطيلة خطية الاستقطاب ومكبر خرج عالي القدرة GaA من ثلاث مراحل بقدرة 4 W على قاعدة منحنية معزولة كهربائياً من أجل منطقة تبريد ممتدة تبلغ قدرتها الإجمالية 120 W على التردد 5,8 GHz. ولا يستعمل النظام مزحزحاً للطور. وتعرض في الشكل 7.6.2 صورة فوتوغرافية لتجربة للتكنولوجيا MPT في غرفة عازلة. وتحركت العربة الطوافة بواسطة طاقة الموجات الصغيرة المزودة من النظام MPT فقط.

وقدم فريق تابع لجامعة ريتسوميكان في اليابان عرضاً توضيحياً لطائرة بدون طيار أثناء التحليق في عام 2015 (الشكل 8.6.2) [NIS 15]. واستخدم الفريق نطاق التردد 430 MHz وقدرة موجات راديوية تبلغ 30 W تقريباً لتزويد الطائرة بدون طيار بالطاقة. وكان وزن نموذج الطائرة بدون طيار 25 g واحتاجت إلى قدرة تيار مستمر قيمتها 2 W للطيران. وحالياً، يمكن للطائرة بدون طيار الطيران فوق هوائي إرسال على مسافة 10 cm تقريباً. ولا يزال النظام قيد التمحيص.

وبدأ فريق أمريكي في جامعة كولورادو ومركز ISAE، فرنسا، بتطوير نظام WPT من أجل مركبة طائرة غير مأهولة (UAV) في 2015 (الشكل 9.6.2) [Dun 15].

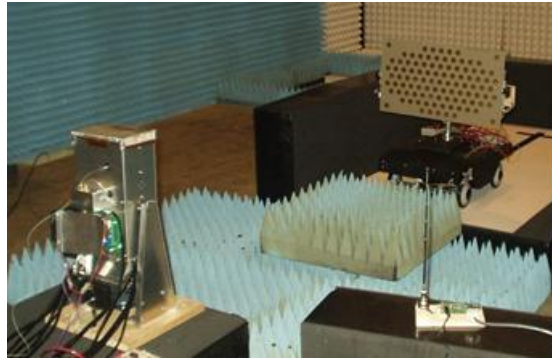
### الشكل 6.6.2

نظام تجريبي لنقل الطاقة بالموجات الصغيرة من أجل عربة طوافة متحركة [SHI 07]



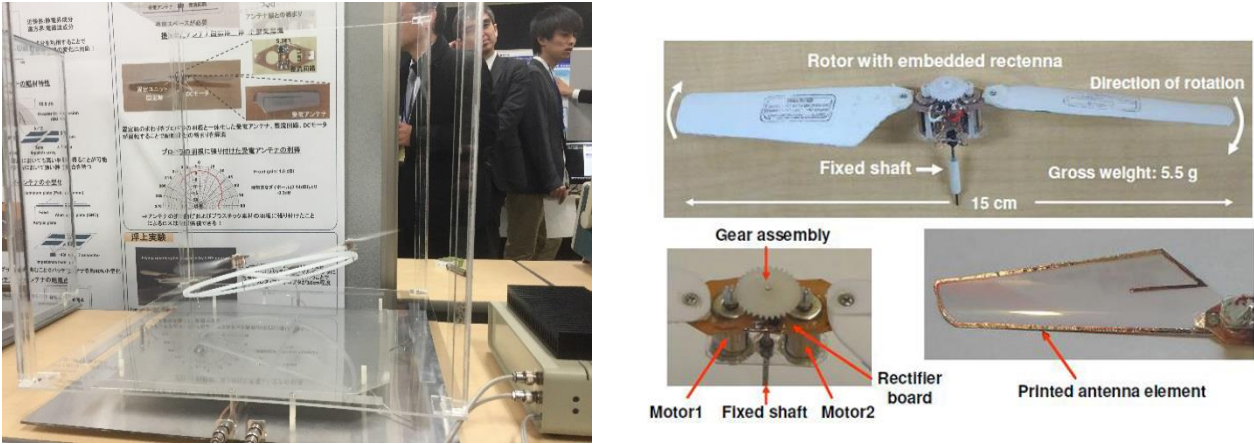
### الشكل 7.6.2

صورة فوتوغرافية لتجربة نقل الطاقة بالموجات الصغيرة إلى مركبة طوافة [SHI 07]



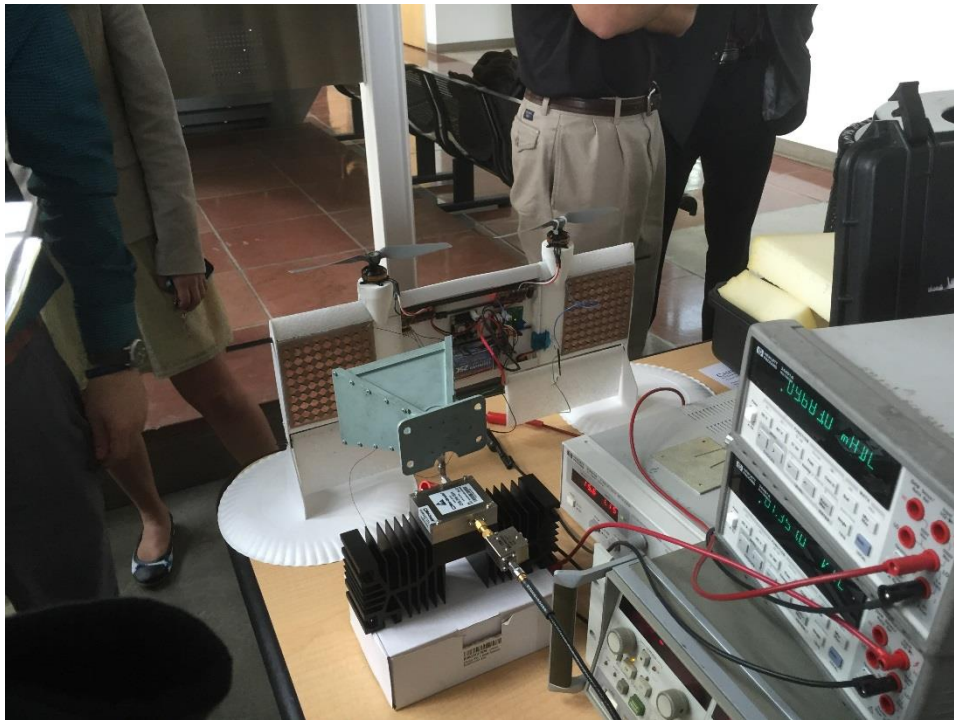
الشكل 8.6.2

نظام تجريبي لإرسال الطاقة لاسلكياً إلى طائرة بدون طيار محلقة [NIS 15] وعرضها التوضيحي في اليابان (مارس 2016، اليابان)



الشكل 9.6.2

نظام تجريبي لإرسال الطاقة لاسلكياً إلى مركبة UAV بالغة الصغر



- [DUN 15] Dunbar, S., F. Wenzl, C. Hack, R. Hafeza, H. Esfeer, F. Defay, S. Prothin, D. Bajon, and Z. Popovic, “Wireless Far-Field Charging of a Micro-UAV”, *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.2, May 2015.
- [NAG 11] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, N. Tsuji, K. Fukuda, Y. Kanari, and K. Yonemoto, “Study on a Microwave Power Transmitting System for Mars Observation Airplane”, *Proc. of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2011)*, pp. 63-66, 2011.

- [NAG 12] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, K. Fukuda, K. Hiraoka, and K. Yonemoto, "Auto Tracking and Power Control Experiments of a Magnetron-based Phased Array Power Transmitting System for a Mars Observation Airplane", *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 29-32, 2012.
- [NIS 15] Nishikawa, H., Y. Kiani, T. Furukoshi, H. Yamaguchi, A. Tanaka, and T. Douseki, "UHF Power Transmission System for Multiple Small Self-rotating Targets and Verification with Batteryless Quadcopter having Rotors with Embedded Rectenna", *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.1, May 2015.
- [MYS 12] Miyashiro, K., F. Inoue, K. Maki, K. Tanaka, S. Sasaki, and K. Komurasaki, "Sequentially Rotated Array Antenna for Wireless Power Transmission to an MAV (in Japanese)", *IEICE Tech. Report*, WPT2012-30, pp. 59-61, 2012.
- [SHI 07] Shinohara, N., K. Nagano, T. Ishii, S. Kawasaki, T. Fujiwara, S. Nakayama, Y. Takahashi, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Hisada, Y. Fujino, S. Mihara, T. Anzai, and Y. Kobayashi, "Experiment of Microwave Power Transmission to the Moving Rover", *Proc. of Int. Sympo. on Antennas and Propagation (ISAP2007)*, 3B1-1, 2007.

## 7.2 الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة (معرف هوية التطبيق: c2)

من السهل تصور الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة عبر الموجات الراديوية لمسافة تزيد عن الكيلومتر بدلاً من نقل الطاقة سلكياً (الشكل 1.7.2). ففي ستينيات القرن الماضي، ثم التوقع بشكل كبير تحقيق تكنولوجيا الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة التي تعمل في مدى الكيلومتر عبر الموجات الصغيرة وذلك بالنسبة لتطبيقات الإرسال اللاسلكي للطاقة. وقد أجرى براون وديكينسون تجارب MPT في JPL في 1975 (الشكل 2.7.2) [BRO 84]. بيد أن أبعاد هوائي الإرسال والاستقبال تحددت نظرياً وكانت كبيرة جداً كي تحقق التطبيق التجاري لإرسال الطاقة بالموجات الصغيرة من نقطة إلى نقطة بتكلفة معقولة كبديل لنقل الطاقة لاسلكياً. وقد روجعت الأنظمة MPT من نقطة إلى نقطة وأجريت تجارب أخرى في تسعينيات القرن الماضي (الشكل 3.7.2) [SHI 98] [CEL 97]. وطور في التجارب صيف هوائي تقويم. وفي ظل ظروف معينة، مثل تزويد قمم الجبال المنعزلة أو الجزر المنعزلة بالطاقة الكهربائية حيث تكون تكلفة مورد سلكي للطاقة باهظة جداً، و/أو عندما تكون الاحتياجات من الطاقة الكهربائية متقطعة، يكون للنظام MPT من نقطة إلى نقطة ميزة واضحة مقابل نقل الطاقة سلكياً.

### الشكل 1.7.2

#### صورة للإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة



## الشكل 2.7.2

تجربة لإرسال الطاقة بالموجات الصغيرة من نقطة إلى نقطة على مسافة 1 ميل بهوائي مكافئ وكليسترون GHz 2,388-kW450 كمرسل و صفييف هوائي تقويم 3,4 × 7,2 m كمستقبل



## الشكل 3.7.2

تجربة لإرسال الطاقة بالموجات الصغيرة من نقطة إلى نقطة على مسافة 50 m باستخدام ماغنترون 3 GHz 2,45-kW في اليابان (1995)



## 1.7.2 الوضع في اليابان

في فبراير 2015، أجريت في اليابان تجربتان لإرسال الطاقة WPT لمسافات طويلة. كانت التجربة الأولى لمسافة 55 m بتردد GHz 5,8 وموجات صغيرة بقدرة 1,8 kW (الشكل 4.7.2). وتم إرسال الموجات الصغيرة من صفييف مطاور بسمك 2,5 cm مزود بمكبرات GaN MMIC ومزحزحات طور MMIC من 5 بتات. وبلغت كفاءة المكبرات GaN عالية القدرة 70% تقريباً عند القدرة 7 W والتردد 25,8 GHz. وقد قامت مؤسسة Mitsubishi Electric Corp بتطوير الصفييف المطاور الرقيق والمكبرات GaN بينما قامت مؤسسة IHI Aerospace بتطوير هوائي التقويم. وقد اعتمدت في هذه التجربة طريقة الكشف الأمامي الاتجاهي للأهداف والمتجه الكهرومغناطيسي الدوار (REV) للكشف عن موقع هوائي التقويم والتحكم في حزمة الموجات الصغيرة. وتولت وكالة JAXA ومؤسسة Mitsubishi Electric Corp تطوير نظام الكشف عن الأهداف وتشكيل الحزم. وكانت التجربة الثانية لإرسال الطاقة WPT لمسافة طويلة لمسافة 500 m بتردد GHz 2,45 و قدرة 10 kW من صفييف مطاور بالماغنترون طورته مؤسسة Mitsubishi Heavy Industries (الشكل 5.7.2). وأجرت التجريبتين المؤسسة اليابانية للأنظمة الفضائية (JSS) بدعم من وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة (METI). وكانت هاتان التجريبتان الميدانيتان نتاج مشروع للبحث والتطوير استغرق ست سنوات من أجل تطوير ساتل بالطاقة الشمسية ويستمر هذا المشروع الذي تديره الوزارة METI حتى 2017 وما بعدها.

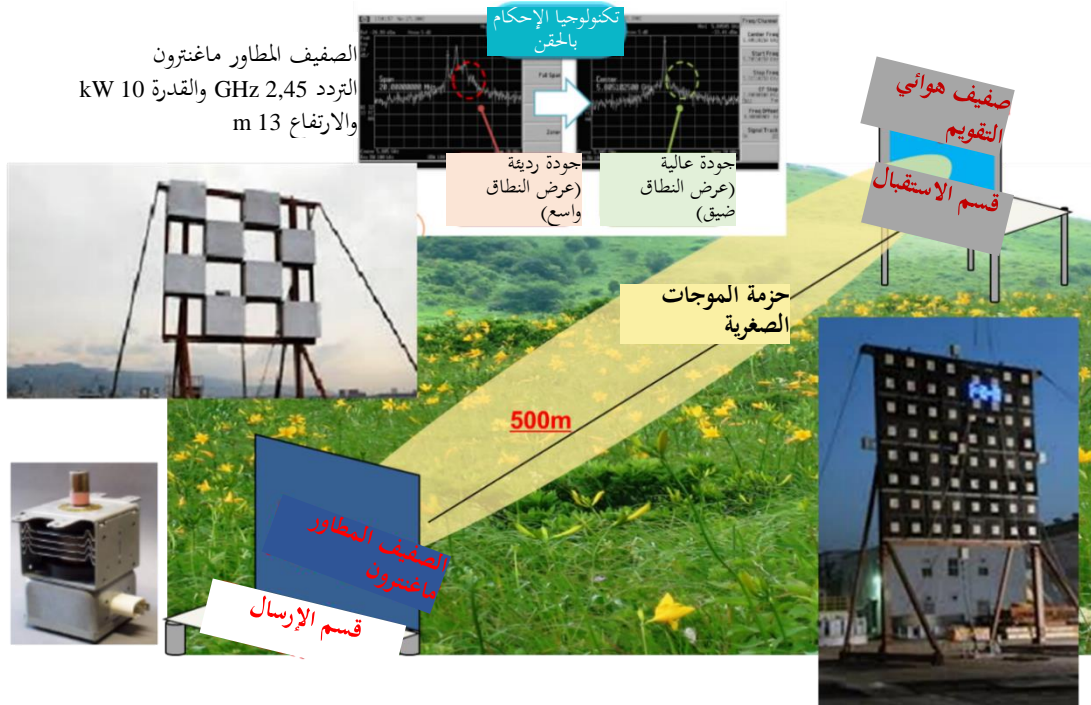
## الشكل 4.7.2

تجربة للتكنولوجيا MPT من نقطة إلى نقطة لمسافة 55 m بصفياف مطاور بتردد 5,8 GHz وقادرة 1,8 kW ومكبرات GaN MMIC في اليابان قامت بها مؤسسة JSS ووزارة METI (2015)



## الشكل 5.7.2

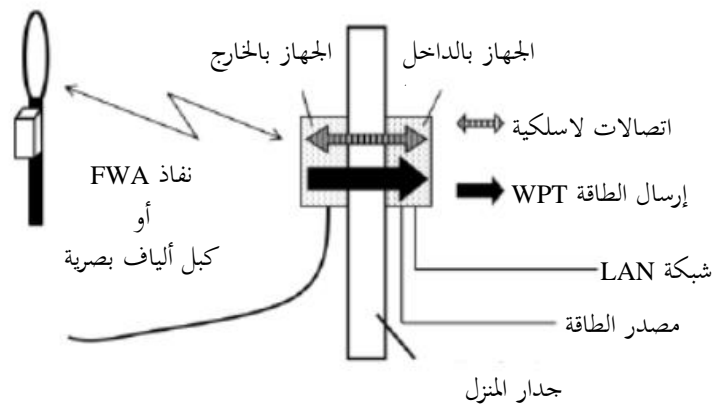
تجربة للتكنولوجيا MPT من نقطة إلى نقطة لمسافة 500 m بصفياف مطاور ماغنترون بتردد 2,45 GHz وقادرة 10 kW قامت بها مؤسسة JSS ووزارة METI في اليابان (2015)



وتعتمد أبعاد الهوائيات وتكلفة النظام MPT على المدى المخطط. ففي اليابان، اقترح نظام MPT من نقطة إلى نقطة قصير المدى من جانب مؤسسة NTT وجامعة كيوتو أطلق عليه اسم نقل الطاقة MPT من أجل النفاذ اللاسلكي الثابت (FWA). ويعرض الشكل 6.7.2 صورة للنظام المقترح [HAT 12]. ويتصل الجهاز الموجود خارج المبنى بالإنترنت عبر النفاذ FWA أو كبل من كبلات الألياف البصرية. ويقوم الجهاز الموجود بالداخل بإرسال الطاقة للجهاز الموجود بالخارج عبر الموجات الصغيرة. ويمكن للجهاز الموجود بالخارج العمل بدون بطارية. ويفضل بالنسبة للنظام أن تقوم نفس الموجة الحاملة للموجات الصغيرة بحمل المعلومات والطاقة معاً وذلك لتقليل حجم النظام. وتم في البداية اختبار تردد يساوي 24 GHz مع تطوير هوائي MMIC بمرشاح خرج من الصنف F، كما هو مبين في الشكل 18.5.4 [HAT 13].

### الشكل 6.7.2

#### مفهوم نظام للنفاذ FWA مدار بالموجات الصغيرة [HAT 12]



وفي 2015 طورت جامعة كيوتو ومجموعة MHI نظام لاسلكي للشحن من أجل عربة صغيرة كهربائية بتردد 2,45 GHz وموجات صغيرة قدرتها 100 W (الشكل 7.7.2). وكانت هذه العملية واحدة من التطبيقات WPT من نقطة إلى نقطة لمسافات قصيرة. وفي 2016 تمت دراسة تطوير نظام WPT للاستعمالات اليومية في جامعة كيوتو.

### الشكل 7.7.2

#### نظام لاسلكي لشحن عربة صغيرة كهربائية





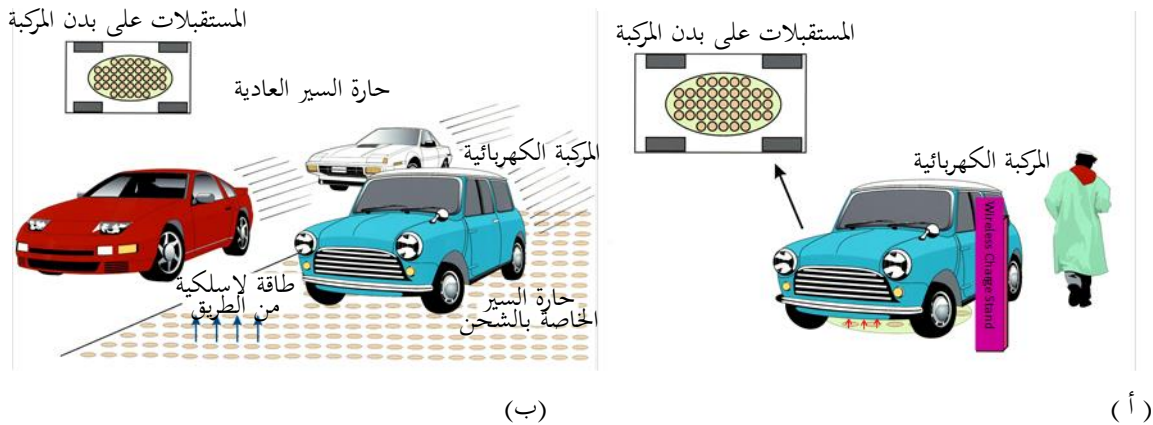
- [BRO 84] Brown, W.C., "The History of Power Transmission by Radio Waves", *IEEE Trans. MTT*, Vol. 32, No. 9, pp. 1230-1242, 1984.
- [SHI 98] Shinohara N. and H. Matsumoto, "Dependence of dc Output of a Rectenna Array on the Method of Interconnection of Its Array Element", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 125, No. 1, pp. 9-17, 1998.
- [CEL 97] Celeste, A., J-D. L.S. Luk, J.P. Chabriat, and G. Pignolet, "The Grand-Bassin Case Study: Technical Aspects", *Proc. of SPS'97*, pp. 255-258, 1997.
- [HAT 12] Hatano, K., N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, and M. Kawashima, "Development of Improved 24GHz-Band Class-F Load Rectennas", *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 163-166, 2012.
- [HAT 13] Hatano, K., N. Shinohara, T. Seki, and M. Kawashima, "Development of MMIC Rectenna at 24 GHz", *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 199-201, 2013.

## 8.2 الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية (معرف هوية التطبيق: c3)

يمكن استخدام التكنولوجيا MPT عالية الكفاءة وليس فقط عبر أدلة الموجة المغلقة ولكن لمسافات قصيرة أيضاً لهوائيات أصغر. وتعرض في الشكل 1.8.2 صورة فوتوغرافية لعملية شحن لاسلكي لمركبة كهربائية باستخدام التكنولوجيا MPT ويسهل استخدام التكنولوجيا MPT للشحن اللاسلكي لكل من المركبات الكهربائية المتوقفة أو أثناء الحركة لعدم الاقتران بين هوائيات الإرسال والاستقبال. ولا تتغير معاوقة الهوائيات بتغير موقع المركبة الكهربائية ولا تتغير كفاءة التكنولوجيا MPT أيضاً. وتحسم تماماً مشكلات السلامة والتداخلات الصادرة عن الموجات الصغيرة بالنسبة للتكنولوجيا MPT سواء في دليل موجي مغلق أو عبر مسافات قصيرة لأنه لا يوجد أي انتشار تقريباً لموجات صغيرة غير متوقعة. وفي أنظمة نقل الطاقة لمسافات قصيرة، يمكن أيضاً زيادة مقدار القدرة اللاسلكية إلى المدى kW لأن الإرسال لا يتفاعل مع البشر أو الكائنات الحية الأخرى بين هوائيات الإرسال والاستقبال.

### الشكل 1.8.2

#### صور الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية (أ) المتوقفة و(ب) المتحركة



### 1.8.2 الوضع في اليابان

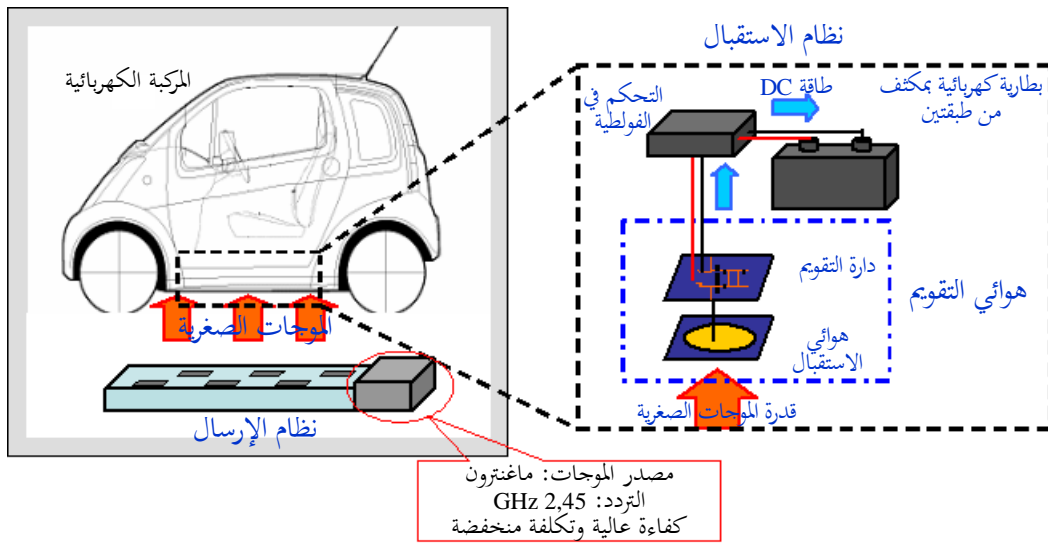
تم اقتراح وتنفيذ نظام MPT من أجل المركبات الكهربائية (الشكل 2.8.2) [SHI 04]. وقد أجريت في الفترة من 2003 إلى 2008 أبحاث مشتركة بين شركة سيارات وجامعة في اليابان لتطوير نظام MPT بين الطريق وبدن مركبة كهربائية باستخدام تردد موجات صغيرة مقداره 2,45 GHz (الشكل 3.8.2) [SHI 11] [SHI 11-2]. وقد استخدمت ماغنترونات وهوائيات شقية لخفض تكاليف النظام. وكانت المسافة بين هوائي الإرسال والاستقبال 12,5 cm تقريباً، وهي مسافة تساوي  $1 \lambda$  على التردد 2,45 GHz. ويمكن شحن البطارية الموجودة على متن المركبة الكهربائية بصورة فعلية باستخدام إرسالات الموجات الصغيرة ذات الكفاءة النظرية للحزم

البالغة 83,7% على الأقل وبكفاءة تجريبية للبحر تبلغ 76,0% على أقل تقدير [SHI 11-2]. وتعد هذه الكفاءة عالية بما يكفي لتحقيق إرسال الطاقة اللاسلكية باستخدام الموجات الصغيرة. وبالنسبة لهذا التطبيق، استخدم ثنائي GaN Schottky جديد لزيادة القدرة المقومة ولخفض زمن شحن المركبة الكهربائية.

وفي عام 2000، طور نموذج MPT موسع لتشغيل مركبة كهربائية [SHI 04]. ولخفض هدر الطاقة، تم اكتشاف موقع نموذج المركبة الكهربائية بواسطة أجهزة استشعار للموقع ولم ترسل طاقة الموجات الصغيرة إلا إلى هذا الموقع.

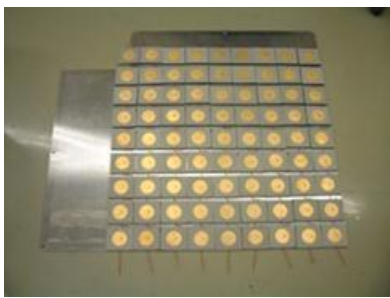
### الشكل 2.8.2

نظام شحن المركبات الكهربائية على الطريق لاسلكياً بالموجات الصغيرة لمسافات قصيرة [SHI 04]

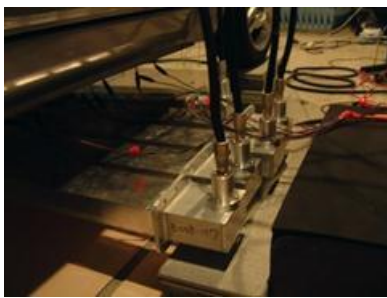


### الشكل 3.8.2

تجربة لجامعة كيوتو للشحن اللاسلكي بالموجات الصغيرة، (أ) النظام، و(ب) هوائي إرسال الموجات الصغيرة على الطريق، و(ج) صفيح هوائي التقويم على بدن المركبة الكهربائية [SHI 11-2]



(ج)



(ب)



(أ)

وفي الفترة من 2006 إلى 2008، أطلقت شركة يابانية مشروعاً للبحث والتطوير للتكنولوجيا MPT من أجل المركبات الكهربائية مع ثلاث شركات سيارات يابانية [SHI 13-2]. وللحد من هدر الطاقة، تم استخدام (1) فولطية بمقدار 6,6 kV مباشرةً لتشغيل الماغنترونات 2,45 GHz كمرسلات للموجات الصغيرة و(2) جدار حاجب تمر الموجات الصغيرة حوله بين هوائيات الإرسال والمستقبلات، و(3) نظام لإعادة تدوير الحرارة. وكانت الكفاءة الإجمالية، بما في ذلك إعادة تدوير الحرارة 38% تقريباً مع قدرة خرج تساوي 1 kW على مسافة 12,5 cm وتعرض في الشكل 4.8.2 النموذج التجريبي الأولي الذي أطلق في 2009.

وفي 2012، بدأ فرع ياباني لشركة سيارات سويدية وشركة يابانية تطوير نظام MPT جديد من أجل شاحنة كهربائية. وقد أفرز النظام السابق مشكلات اقتران متبادل بين هوائيات الإرسال والاستقبال نظراً للقصر الشديد لمسافة نقل الطاقة MPT؛ لذا تم تغيير النظام MPT الجديد من التشكيلة من الطريق إلى البدن إلى التشكيلة من القمة إلى السقف (الشكل 5.8.2) [SHI 13-1] [SHI 13-3]. للاستفادة من التكنولوجيا MPT بوصفها تكنولوجيا WPT للمسافات الطويلة. وكانت المسافة بين هوائي الإرسال والاستقبال فوق سطح المركبة الكهربائية 6-2 m وذلك طبقاً لنوع المركبة المستخدمة. وللحفاظ على كفاءة عالية على المسافة المتغيرة، اقترح نظام صفييف مطاور يمكنه تكوين حزمة مسطحة على هوائيات الاستقبال.

وفي السادس من يوليو 2012، أطلق صفييف هوائي تقويم 10 kW بكفاءة 84% يعمل على تردد 2,45 GHz من أجل نظام WPT متوسط المسافة (الشكل 6.8.2) [FUR 13]. وتجاوزت كثافة قدرة الموجات الصغيرة المستقبلية 3,2 kW/m<sup>2</sup> على مسافة 4 m تقريباً من المرسل.

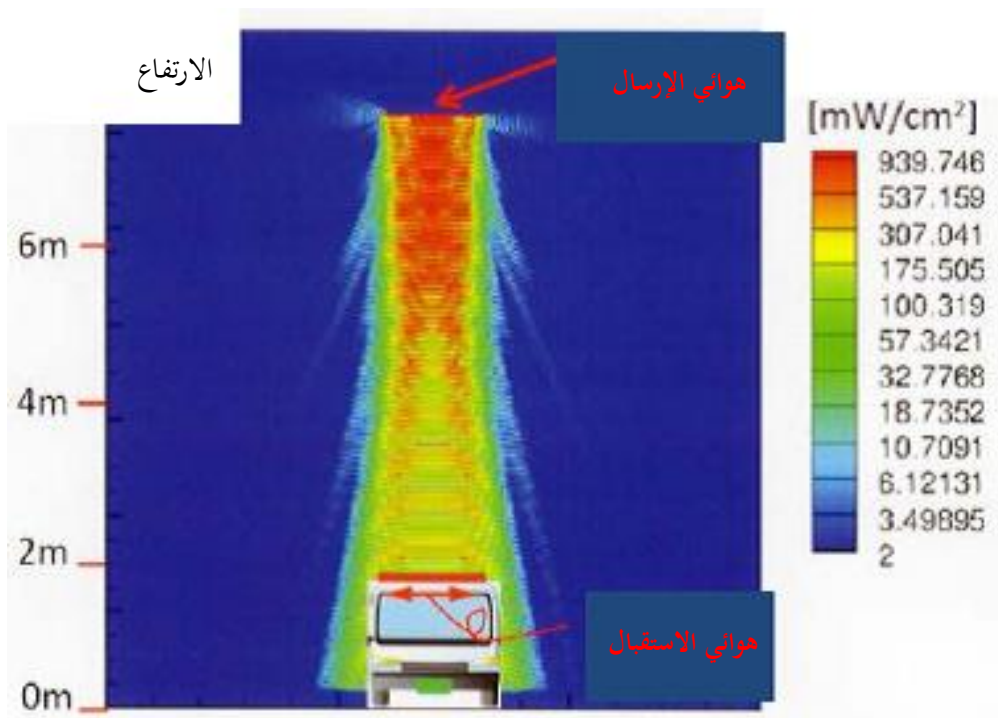
#### الشكل 4.8.2

تجربة للشحن اللاسلكي بالموجات الصغيرة لفريق Mitsubishi Heavy Insustries في 2009 [SHI 13-2]



## الشكل 8.5.2

نظام مقترح للشحن اللاسلكي متوسط المسافة لمركبة كهربائية  
ومحاكاة FDTD لحزمة الموجات الصغيرة [SHI 13-1]



## الشكل 6.8.2

صورة فوتوغرافية لهوائي تقويم 10 kW يعمل على التردد 2,45 GHz  
من أجل الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية [FUR 13]



- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, "Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (in Japanese)", *IEICE Tech. Report*, WPT2012-47, pp. 36-39, 2013.
- [SHI 04] Shinohara, N. and H. Matsumoto, "Wireless Charging System by Microwave Power Transmission for Electric Motor Vehicles (in Japanese)", *IEICE Trans. C*, Vol.J87-C, No. 5, pp. 433-443, 2004.

- [SHI 11] Shinohara, N., “Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from Short Range to Long Range“, *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 10, No. 4, pp. 224-230, 2011.
- [SHI 11-2] Shinohara, N., “Wireless Charging System of Electric Vehicle with GaN Schottky Diodes“, *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS) Workshops*, WFA “Wireless Power Transmission”, 2011.
- [SHI 13] Shinohara, N. and Yuta Kubo, “Suppression of Unexpected Radiation from Microwave Power Transmission System toward Electric Vehicle“, *Proc. of 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, E3-4 (No. 290450), 2013.
- [SHI 13-2] Shinohara, N., “Wireless Power Transmission Progress for Electric Vehicle in Japan“, *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 109-111, 2013.
- [SHI 13-3] Shinohara, N., Y. Kubo, and H. Tonomura, “Mid-Distance Wireless Power Transmission for Electric Truck via Microwaves“, *Proc. of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMT-S2013)*, pp. 841-843, 2013.

## 9.2 ساتل الطاقة الشمسية (معرف هوية التطبيق: c4)

يعد ساتل الطاقة الشمسية (SPS) التطبيق الأكبر للإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية [SPS 07]. ويصمم الساتل SPS كساتل ضخمة بالطاقة الشمسية في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، على ارتفاع 36 000 km فوق سطح الأرض (الشكل 1.9.2)، حيث لا يوجد غطاء غيوم ولا فترات ظلام ليلية طوال العام. وترسل الطاقة المولدة في الساتل SPS إلى الأرض عبر الموجات الصغرية. ونظراً للحجم الكبير للهوائي، المحسوب نظرياً، اللازم لتحقيق كفاءة عالية للحزمة تجاه هدف على مسافة بعيدة جداً مثل الساتل SPS، يلزم توفير هوائيات بأبعاد 2 km تقريباً على التردد 5,8 GHz من أجل الساتل SPS وهو أمر ليس مستحيلاً ولا تمتص طاقة الموجات الصغرية في الهواء والسحب والأمطار، وبالتالي، يمكن الحصول على مصدر طاقة تقريباً مستقر وخالٍ من ثاني أكسيد الكربون من الطاقة الشمسية من الساتل SPS باستخدام التكنولوجيا MPT يساوي عشرة أضعاف الطاقة الشمسية المتحصل عليها من مصادر الطاقة الشمسية الأرضية.

وفي النظام MPT الخاص بالساتل SPS، يجب استخدام صفيح ضخمة مطاور ذي كفاءة عالية. ويعد الصفيح المطاور ضرورياً لتوجيه حزمة القدرة نحو هدف ذي هوائي تقويم صغير على الأرض ضمن هامش تسامح مقداره 0,0005 درجة، بالرغم من التحرك الدائم لهوائي إرسال الساتل SPS وتموجه. ولأسباب اقتصادية، يجب توليد حزمة الطاقة وإرسالها بدون خسائر كبيرة.

الشكل 1.9.2

صورة لساتل الطاقة الشمسية



[SPS 07] Report of the URSI Inter-Commission Working Group on SPS, URSI, 2007, available at URL: <http://www.ursi.org/files/WhitePapers/WSPSPS-ReportMin.pdf>

### 3 التكنولوجيات المستخدمة في تطبيقات الإرسال اللاسلكي للطاقة

في أي نظام WPT عبر حزم الترددات الراديوية، تستخدم الهوائيات لإرسال الموجات الراديوية واستقبالها. ولا يوجد اقتران كهرومغناطيسي بين هوائيات الإرسال والاستقبال. لذا، لا يعتمد عدد المرسلات والمستقبلات على معلمات دارات المرسلات والمستقبلات. وتقوم النظرية الرئيسية للتكنولوجيا WPT عبر حزم الترددات الراديوية على معادلة إرسال فريس. ولا تحتاج الموجات الراديوية التي ترسل الطاقة اللاسلكية إلى التشكيل مثل أنظمة الاتصالات الراديوية.

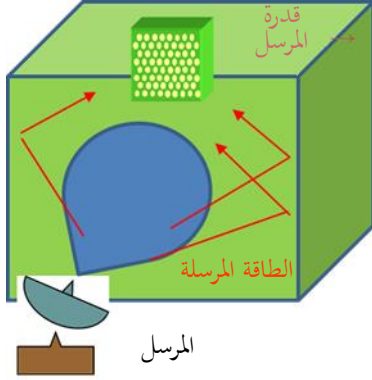
وتصنف تكنولوجيا الإرسال اللاسلكي للطاقة (WPT) عبر حزم الترددات الراديوية كالتالي (الشكل 1.3 والجدول 1.3):

- أ) حزمة واسعة نحو مستعملين متعددين على مدى قصير
- ب) الإرسال اللاسلكي للطاقة في منطقة مغلقة
- ج) حزمة صفيحة نحو مستعمل وحيد على مدى قصير/طويل

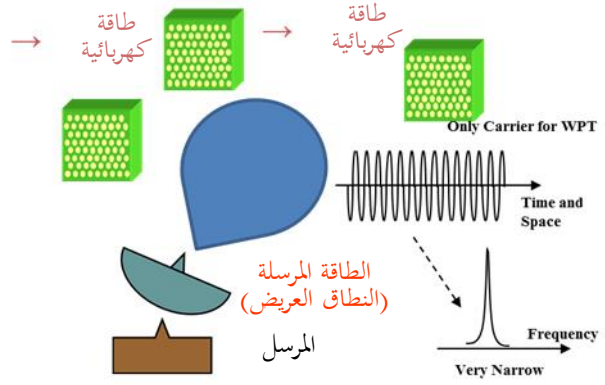
## الشكل 1.3

## الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر تكنولوجيات حزم الترددات الراديوية

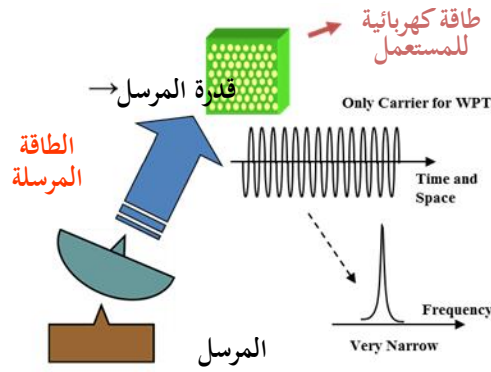
(ب) الإرسال اللاسلكي للطاقة في منطقة مغلقة



(أ) حزمة واسعة نحو مستعملين متعددين على مدى قصير



(ج) حزمة صفيحة نحو مستعمل وحيد على مدى قصير/طويل



## الجدول 1.3

## تصنيف تطبيقات الإرسال اللاسلكي للطاقة

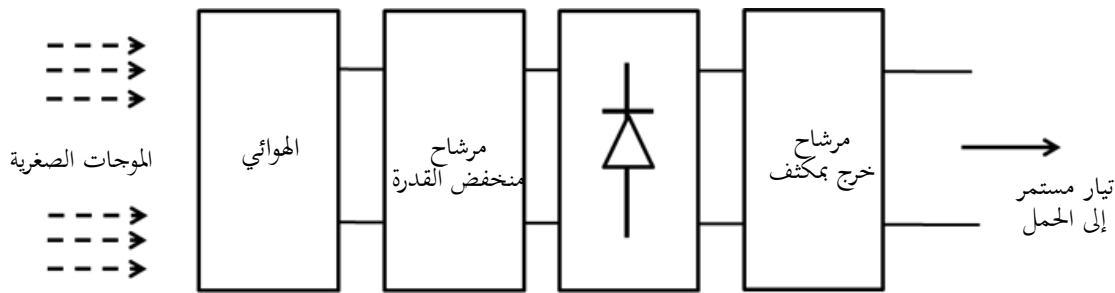
معرف الهوية	التطبيق	(أ) حزمة واسعة نحو مستعملين متعددين على مدى قصير	(ب) الإرسال اللاسلكي للطاقة في منطقة مغلقة	(ج) حزمة صفيحة نحو مستعمل وحيد على مدى قصير/طويل
a1	شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً	○		
a2	شاحن لاسلكي للأجهزة المتنقلة	○		
b1	صفائح نقل الطاقة لاسلكياً		○	
b2	نقل طاقة الموجات الصغيرة (MPT) في أنابيب		○	
b3	مباني الموجات الصغيرة		○	
c1	الإرسال اللاسلكي للطاقة إلى أهداف متحركة/طائرة			○
c2	الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة			○
c3	الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية			○
c4	ساتل الطاقة الشمسية			○

وفي عملية الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزمة ضيقة والإرسال اللاسلكي للطاقة في منطقة مغلقة، يمكن إزالة الإشعاعات غير المتوقعة عبر تكنولوجيا الهوائيات. وهوائيات الصفيح المطاور التي يمكنها التحكم في اتجاه الحزمة وتشكيلها بهوائيات مجمعة تخضع للتحكم في الطور والاتساع، تستعمل في بعض الأوقات في الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزمة ضيقة. وقد طورت هوائيات الصفيح المطاور لأغراض الإرسال اللاسلكي للطاقة وقد أجريت تجارب ميدانية لعملية الإرسال اللاسلكي للطاقة [SHI 13].

والموجات الراديوية في حد ذاتها عبارة عن طاقة كهربية. ويشتمل الاختلاف الوحيد بين الموجات الراديوية والكهرباء في التردد. وتستخدم الموجات الراديوية في النطاقات GHz-MHz في الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية، وفي الاتصالات اللاسلكية وفي الاستشعار عن بُعد. وتستخدم التيار المستمر أو الطاقة Hz 60/50 (التردد الخاص بالطاقة التجارية) ككهرباء. لذا فإن الأمر الوحيد المطلوب في الإرسال اللاسلكي للطاقة يتمثل في تحويل الترددات من التردد الراديوية إلى تردد الطاقة/DC. لذا التجارية، بما يشمل ليس فقط الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية، بل الإرسال اللاسلكي للطاقة حديثاً والإرسال اللاسلكي للطاقة باقتران الرنين أيضاً. وتستعمل هوائي التقويم وهو هوائي مزود بدارة تقويم باستخدام الثنائيات، كمستقبل ومقوم في عملية الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية (الشكل 2.3). وتبلغ كفاءة التحويل RF-DC لهوائي متطور 90% تقريباً عند تردد GHz 2,45 [BRO 80] [FUR 13]، و 80% عند التردد GHz 5,8 [MCS 97]. ويمكن استخدام هوائي التقويم في جميع عمليات الإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية، على سبيل المثال في النطاق UHF [SAM 09] والنطاق X [EPP 00] والنطاق K [TAK 13] والنطاق W [WEI 14].

### الشكل 2.3

#### هوائي التقويم، Rectenna



- [BRO 80] Brown, W.C., "The History of the Development of the Rectenna, *Proc. of SPS microwave systems workshop*, pp. 271-280, Jan. 15-18, 1980, at JSC-NASA.
- [EPP 00] Epp, L.W., A.R. Khan, H.K. Smith, and R.P. Smith, "A compact dual polarized 8.51GHz-rectenna for high-voltage (50 V) actuator applications", *IEEE Trans. MTT*, Vol. 48, No. 1, pp. 111-119, 2000.
- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, "Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (*in Japanese*)", *IEICE Technical Report, WPT2012-7*, pp. 36-39, 2013.
- [MCS 97] McSpadden, J.O., L. Fun, and K. Chang, "A High Conversion Efficiency 5.8 GHz Rectenna", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 547-550, 1997.
- [SAM 09] Sample, A.P. and J.R. Smith, "Experimental Results with two Wireless Power Transfer Systems", *Proc. of 2009 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, MO2A-5, pp. 16-18, 2009.
- [SHI 13] Shinohara, N., "Beam Control Technologies with a High-Efficiency Phased Array for Microwave Power Transmission in Japan", *Proceeding of IEEE*, vol. 101, Issue 6, pp. 1448-1463, 2013.
- [TAK 13] Takacs, A., H. Aubert, L. Despoisse, and S. Fredon, "K-band Energy Harvesting for Satellite Application", *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS)*, WE3G-1, 2013.



[WEI 14] Weissman, N., S. Jameson and E. Socher, "W-Band CMOS On-Chip Energy Harvester and Rectenna", *Proc. of Int. Microwave Sympo. 2014*, TH2C-5, 2014.

#### 4 المنظمات المتوقع مساهمتها في تقييس تكنولوجيا الإرسال اللاسلكي للطاقة

بالرغم من عدم وجود منظمة تقييس للتكنولوجيا WPT للموجات الراديوية، يتوقع أن تساهم بعض المنظمات العاملة على تشجيع هذه التكنولوجيا في تقييسها.

##### 1.4 أوروبا

#### الإرسال اللاسلكي للطاقة من أجل أجهزة إلكترونية مستدامة (WiPE) [W13]

<http://www.cost-ic1301.org/> [W13]

ظل التعاون COST إطاراً حكومياً دولياً للتعاون الأوروبي في مجال الأبحاث العلمية والتقنية منذ إنشائه في 1971. ويتمثل هدف التعاون COST في تعزيز تنافسية الأبحاث العلمية والتقنية في أوروبا للأغراض السلمية.

وتهدف أعمال COST إلى معالجة دارات التكنولوجيا WPT وأنظمتها واستراتيجياتها الفعالة المصممة خصيصاً من أجل الأنظمة التي تعمل بدون بطاريات. وأجهزة الاستشعار بدون بطاريات والتعرف المنفعل بالموجات الراديوية RFID والاتصالات في القريب (NFC) ترتبط بشدة بمفاهيم الاستفادة من التكنولوجيا WPT وأنظمة جني الطاقة من أجل التشغيل عن بُعد للأجهزة المتنقلة أو شحن البطاريات عن بُعد، مما يساهم في تطوير نمو إنترنت الأشياء (IoT) وتعزيزه.

في هذا السياق ترمي أعمال COST إلى جمع مصممي دارات وأنظمة الترددات الراديوية ذوي الخلفيات المختلفة من أجل: (1) توفير حلول معززة للدارات والأنظمة الفرعية لزيادة الكفاءة في التكنولوجيا WPT؛ و(2) دراسة استخدام المواد والتكنولوجيات الجديدة التي تسمح بخفض التكلفة إلى الحد الأدنى وتعظيم اندماج الأجهزة الإلكترونية مع البيئة ومع التطبيقات المستهدفة.

ويتوقع أن تشمل فوائد أعمال COST إنشاء شبكة واسعة من الخبراء من كل من الهيئات الأكاديمية والصناعة يمكنها مواجهة التحديات القائمة والمقبلة في سيناريوهات الإرسال اللاسلكي للطاقة بصورة متعددة الاتجاهات تمهد الطريق أمام الأجيال المستقبلية من حلول التكنولوجيا WPT وما يرتبط بها من تنظيم.

وتعد COST إطاراً نموذجياً من أجل توحى الجهود على الصعيد الدولي ووضع أوروبا كمجتمع علمي وصناعي رائد في مجال الإرسال اللاسلكي للطاقة. وتضم لجنة إدارة هيئة التعاون WiPE 27 بلداً أوروبياً في الوقت الحالي مع مشاركة أكثر من 100 كيان في الاجتماعات وورش العمل التي تعقد بانتظام. كما تنظم الهيئة مدارس PhD سنوية بشأن التكنولوجيا WPT.

وتضم الهيئة WiPE خمسة أفرقة عمل (WG) بحثية. وهي:

1. فريق العمل 1. أنظمة الإرسال اللاسلكي للطاقة للمجال البعيد
2. فريق العمل 2. أنظمة الإرسال اللاسلكي للطاقة للمجال القريب
3. فريق العمل 3. المواد والتكنولوجيات الجديدة
4. فريق العمل 4. التطبيقات (فضائية، صحية، زراعية، أنظمة المركبات، التطبيقات المنزلية)
5. فريق العمل 5. التنظيم والأثر على المجتمع

## 2.4 اليابان

## 1.2.4 اتحاد نقل الطاقة لاسلكياً من أجل التطبيقات العملية (WiPoT) [WI]

<http://www.wipot.jp/english/> [WI]

تتمثل أهداف الاتحاد في: (1) موازنة الأفكار والحلول الجديدة مع احتياجات المجتمع فيما يتعلق بتكنولوجيا WPT، خاصةً ما يتعلق بإرسال الطاقة بالموجات الصغيرة، و(2) تسريع وتيرة تطوير تطبيقات عملية للتكنولوجيا WPT. ولتحقيق هذه الأهداف، يوفر الاتحاد WiPoT معلومات ليس عن التكنولوجيا فحسب، بل عن التقييس والسلامة واحتياجات المستعمل أيضاً. كما يعلن الاتحاد عن التكنولوجيا WPT، بما في ذلك التكنولوجيا MPT في جميع أنحاء العالم. وقد تأسس الاتحاد في عام 2013 ويضم في عضويته 29 شركة و38 جامعة و3 معاهد حتى مايو 2016.

ويرى الاتحاد أن إرسال الطاقة بالموجات الصغيرة يمكن أن يشكل تكنولوجيا أساسية لجميع تكنولوجيا الإرسال اللاسلكي للطاقة وللإتحاد خمسة أفرقة عمل كالتالي:

فريق العمل 1. تطبيقات الحزم الواسعة والقدرة المنخفضة

فريق العمل 2. تطبيقات الحزم الضيقة والقدرة العالية

فريق العمل 3. الإرسال اللاسلكي للطاقة في منطقة مغلقة

فريق العمل 4. إضفاء الطابع التجاري

فريق العمل 5. التقييس

## 2.2.4 منتدى النطاق العريض اللاسلكي (BWF) [BWF]

<http://bwf-yrp.net/english/> [BWF]

سيكون الهدف من المنتدى المساهمة في دفع التقدم بشكلٍ سليم في أنظمة الاستخدامات الراديوية وخدماتها الجيدة للنهوض بالتبكير في إضفاء الطابع التجاري والتطوير الأولي للأنظمة والخدمات باستخدام تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة. ولتحقيق هذا الغرض، يقوم المنتدى بإجراء دراسات للبحث والتطوير وجمع المعلومات والاتصال بالمنظمات المعنية والتنسيق معها وتعميم الأنشطة وما إلى ذلك، بشأن تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة. ويضم المنتدى في عضويته 128 هيئة حتى 11 يناير 2013.

وتتمثل أنشطة المنتدى فيما يلي:

(1) البحث والتطوير بشأن تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة باستخدام منصات الاختبار

(2) دراسة بشأن تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة

(3) جمع المعلومات عن تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة وتبادلها وتوفيرها

(4) الاتصال بالمنظمات ذات الصلة بتكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة والتنسيق معها

(5) نشر تكنولوجيا الاتصالات الراديوية الجديدة وزيادة الوعي بها

(6) الأنشطة الأخرى الضرورية لتحقيق هدف المنتدى

ولدى اللجنة الفرعية لتطبيق التكنولوجيا فريق عمل معني بالإرسال اللاسلكي للطاقة.

يتولى الفريق الفرعي رقم 5 في فريق العمل المعني بالإرسال اللاسلكي للطاقة التابع لمنتدى النطاق العريض اللاسلكي (BWF) مسؤولية صياغة المعايير التقنية لتكنولوجيا WPT باستخدام بروتوكولات الصياغة الخاصة برابطة صناعات ودوائر الأعمال في مجال الاتصالات الراديوية (ARIB). وسوف يُرسل مشروع المعيار الذي وضعه فريق العمل المعني بالإرسال اللاسلكي للقدرة إلى الرابطة ARIB للموافقة عليه.

### 3.4 المنظمات الدولية الأخرى

تقوم جمعية نظريات وتقنيات الموجات الصغيرة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE MTT) حالياً بتشجيع تكنولوجيات الطاقة اللاسلكية أو نقل الطاقة وتحويلها باستخدام إما تقنيات المجال القريب أو تقنيات المجال البعيد لمنصات النفاذ الثابت أو المتنقل. ولهذا الغرض، تم تأسيس اللجنة التقنية رقم 26 المسماة بلجنة نقل الطاقة اللاسلكية وتحويلها في جمعية نظريات وتقنيات الموجات الصغيرة في 2011 [TC26]. وحتى الطاقة اللاسلكية من مصادر الترددات الراديوية (RF) يشكل أيضاً جزءاً من اهتمام هذه اللجنة. وفي الندوة الدولية للموجات الصغيرة (IMS)، نظمت اللجنة مسابقات تصميم على مستوى الطلبة سنوياً اعتباراً من عام 2012. وشارك في المسابقة التي جرت في الندوة IMS لعام 2014 عدد 15 فريقاً من 12 بلداً. وظلت اللجنة TC26 تنظم مؤتمراً دولياً يسمى مؤتمر النقل اللاسلكي للطاقة (WPTc) منذ عام 2013، بدأ كورشة عمل في 2011 تكررت في 2012. وقد تجاوز عدد الورقات المقدمة إلى هذا المؤتمر 170 ورقة في 2015.

ويتألف الاتحاد العالمي لعلوم الراديو (URSI) من 10 لجان. وينظم الاتحاد URSI فريق العمل المشترك بين اللجان (ICWG) المعني بالساتل SPS والذي يعد واحداً من تطبيقات التكنولوجيا MPT وقد نشر الفريق في 2007 تقريراً رسمياً عن الساتل SPS بالتعاون مع جميع اللجان، بما في ذلك اللجان التي تغطي أنظمة السواتل SPS والتكنولوجيات الراديوية فضلاً عن نقل الطاقة بالموجات الصغيرة (MPT) والتداخل الكهرومغناطيسي والفلك الراديوي ومسائل السلامة. وكان للجمعيات العامة للاتحاد URSI (GA) التي تعقد كل ثلاث سنوات دورات عن الساتل SPS و/أو الإرسال اللاسلكي للطاقة في الفترة من 2002 إلى 2014 (الأخيرة). ونظمت محاضرة عامة عن جني طاقة الترددات الراديوية والإرسال اللاسلكي للطاقة في الجمعية العامة للاتحاد URSI في 2014.

[TC26] IEEE MTTs TC-26 <http://www.mtt-archives.org/~mtt26/>

### 5 حالة الطيف بالنسبة للإرسال اللاسلكي للطاقة عبر حزم الترددات الراديوية

يعد نطاق الخدمات الصناعية والعلمية والطبية (ISM) أحد نطاقات التردد المتوقع استخدامها في الإرسال اللاسلكي للطاقة. وما دامت إشارات الإرسال اللاسلكي للطاقة لا تحمل معلومات في صورة علامات أو إشارات أو صور، لا يجوز اعتبارها خدمة اتصالات تقليدية.

ويعد النطاق MHz 928-902 للخدمات ISM (في الإقليم 2 فقط) غير مناسب بوجه عام قيماً عدا للتطبيقات WPT قصيرة المدى مثل شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً ومصدر الطاقة UPS. وقد استخدم النطاقات GHz 2,5-2,4 و GHz 5,875-5,725 للخدمات ISM في تجارب التكنولوجيا WPT ويتوقع استخدامها في التطبيقات WPT ذات الحزم الضيقة. ويفضل النطاق GHz 2,5-2,4 للخدمات ISM أكثر من نطاقات التردد الأعلى لصغر مظاهر الانحطاط في الانتشار. وللتطبيقات التي يفشل فيها الإرسال بسبب المطر وغيره يمكن توفير احتياطي لها من خلال وجود، على سبيل المثال، أنظمة طاقة احتياطية أو بديلة أو تخزين كافي للطاقة، يعد النطاق GHz 5,875-5,725 للخدمات ISM مرغوباً نظراً لانخفاض أبعاد الفتحات.

ويشير الملحق 1 بالتوصية ITU-R SM.1056 إلى نقل الطاقة بوصفه تطبيقاً مستقبلياً للخدمات ISM. ومع ذلك، فإن أحكام لوائح الراديو المتعلقة بالخدمات ISM تنطوي على أنه ربما لم يتم وضع الإرسال اللاسلكي للطاقة عند تعريف وتسمية نطاقات التردد للخدمات.

### 6 الخلاصة

يشمل هذا التقرير التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا WPT عبر حزم الترددات الراديوية والتكنولوجيات المستخدمة في هذه التطبيقات ونطاقات التردد المرشحة.

وتمت دراسة شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً والشاحن اللاسلكي للأجهزة المتنقلة وصفائح نقل الطاقة لاسلكياً ونقل طاقة الموجات الصغيرة في أنابيب. ومباني الموجات الصغيرة والإرسال اللاسلكي للطاقة إلى أهداف متحركة/طائرة والإرسال

اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة والشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية وساتل الطاقة الشمسية، كتطبيقات لنقل الطاقة لاسلكياً عبر حزم الترددات الراديوية. وجاري دراسة وتطوير التكنولوجيات WPT باستخدام الحزم الواسعة لمستعملين متعددين على مدى قصير والتكنولوجيات WPT في منطقة مغلقة والتكنولوجيات WPT باستخدام الحزم الضيقة لمستعمل واحد على مدى قصير/طويل.

وتمت دراسة التكنولوجيات WPT باستخدام الحزم الواسعة لمستعملين متعددين على مدى قصير في النطاقات GHz 2,45 و GHz 5,8 و MHz 900. وتدرس شبكات أجهزة الاستشعار المزودة بالطاقة لاسلكياً والشاحن اللاسلكي للأجهزة المتنقلة في إطار هذه التكنولوجيات.

وتمت دراسة التكنولوجيات WPT في منطقة مغلقة في النطاقين GHz 2,45 و GHz 5,8 وتدرس صفائح نقل الطاقة لاسلكياً في إطار هذه التكنولوجيات.

وتمت دراسة التكنولوجيات WPT في منطقة مغلقة والتكنولوجيات WPT باستخدام الحزم الضيقة لمستعمل واحد على مدى قصير/طويل في النطاقين GHz 2,45 و GHz 5,8. وتدرس تطبيقات الإرسال اللاسلكي للطاقة من نقطة إلى نقطة والشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية وساتل الطاقة الشمسية في إطار هذه التكنولوجيات

واستناداً إلى هذا التقرير، من الضروري إجراء مزيد من الدراسات بشأن الأثر بين الأنظمة WPT أعلاه والأنظمة القائمة الأخرى وجوانب السلامة مثل التعرض البشري للمجالات الكهرومغناطيسية من أجل تنفيذ هذه التطبيقات.