

Introduction aux capteurs radiofréquences quantiques utilisant la technologie atomique de Rydberg

Un aperçu des capteurs Rydberg

Un capteur Rydberg est un dispositif qui utilise certains effets quantiques au niveau atomique pour pouvoir faire la détection et le mesurage des champs électromagnétique aux radiofréquences (RF). Comment ça fonctionne ? Tout d'abord, la cellule contient l'élément césium dans une petite perle fabriquée de verre. Il y a un vide partiel dedans, et donc le métal césium est en état gazeux. Pour faire marcher comme capteur, il faut qu'on excite les atomes avec une source de lumière cohérente, ça veut dire avec un laser. L'énergie de lumière de laser causera l'instabilité des atomes césium, et donc elles seront sensibles aux énergies radiofréquence. Les atomes dans cet état sont connus par le nom d'atomes Rydberg. La cellule à vapeur comporte comme une antenne à récepteur, mais les mécanismes internes sont très différents par rapport une antenne conventionnelle. Leurs capacités dépassent celles des antennes conventionnelles, en particulier dans les régions millimétriques telles que 20 GHz à 100 GHz ou plus.

Une caractéristique importante des capteurs Rydberg est le fait qu'ils s'auto-calibrent, ce qui signifie qu'ils peuvent être utilisés pour fabriquer des normes de capteur de puissance rayonnée primaires. De plus, il est possible de fabriquer les capteurs en matériau diélectrique, notamment en silicium et en verre, qui est connecté à la fibre optique. Cela signifie qu'un capteur Rydberg peut être introduit dans le champ proche d'une antenne de transmission ou placé très près d'autres éléments d'un circuit radiofréquence, sans trop perturber les champs électriques à proximité du circuit.

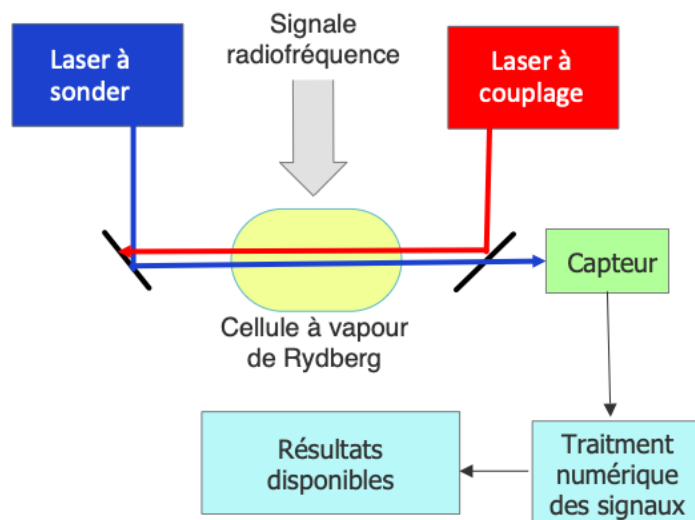


Figure 1: La mise en œuvre de base de l'appareil utilisant des cellules à vapeur de Rydberg pour la détection des signaux radiofréquences - la preuve de concept est mise en œuvre par les chercheurs d'Ideas Lab dans une boîte de 60 x 60 x 64 cm.

Cette fonction rend les mesures de puissance plus précises et, dans certains cas, il sera possible de mesurer dans des conditions très spéciales, où les antennes conventionnelles ne seraient pas pratiques. De plus, les capteurs fonctionnent à la résonance, ils sont donc plus sensibles que les antennes conventionnelles.

Les deux caractéristiques, auto-calibrage et perturbation minimale des champs électriques, permettent de mettre en œuvre des solutions pratiques aux problèmes liés aux ondes millimétriques, où la mesure par câblage est peu pratique en raison de la forte atténuation des câbles et de l'instabilité résultant du mouvement du câblage.

Les tests radiofréquence en direct OTA (Over-the-Air) sont devenus de plus en plus la norme à des fréquences millimétriques, et l'utilisation de capteurs Rydberg pour mesurer la puissance à des fréquences comme environ 60 GHz, par exemple, est une solution utile. Pour les antennes intégrées aux émetteurs-récepteurs eux-mêmes, des tests OTA en direct seront utilisés pour vérifier facilement des systèmes complets. Le fait que les capteurs Rydberg s'auto-calibrent est important pour tester et certifier les appareils sans fil de nouvelle génération, ce qui peut être coûteux et prendre du temps, en particulier dans les environnements où les appareils testés sont constamment déplacés par des techniciens ou des robots.

Une autre caractéristique très importante est que les capteurs fonctionnent extrêmement bien dans les fréquences millimétriques (30 GHz à 300 GHz). En fait, les capteurs sont capables de bien fonctionner dans les fréquences terra hertz (THz). Il s'agit d'une capacité très importante au vu des tendances des régulateurs nationaux, ainsi que des organismes de normalisation tels que l'Union internationale des télécommunications (UIT), a attribué de nouvelles fréquences de plus en plus élevées au fil du temps.

Il est également possible de fabriquer les réseaux d'antennes en utilisant plusieurs cellules à vapeur. Ceux-ci peuvent être utilisés pour construire des cartes tridimensionnelles des champs électriques qui sont produits par des antennes de transmission ou d'autres dispositifs. Cela peut se faire sans pièces mécaniques mobiles ni même pièces métalliques susceptibles de perturber les champs électromagnétiques.

Des informations de polarisation et de phase sont disponibles, permettant une cartographie sophistiquée des modèles de champ RF, ainsi que certaines applications telles que le radar. Toutes les données sont traitées à l'aide du traitement numérique du signal (DSP) à des fréquences radio inférieures. Certaines expériences ont mis en évidence une imagerie de champ électrique à une résolution $\lambda / 650$, loin dans le régime de sous-longueur d'onde, sans interférer avec la caractérisation du dispositif testé. De plus, la technologie est 300 fois plus sensible, avec une résolution de champ détectable 70 fois meilleure et une résolution spatiale 300 fois meilleure que les antennes dipôles standard.

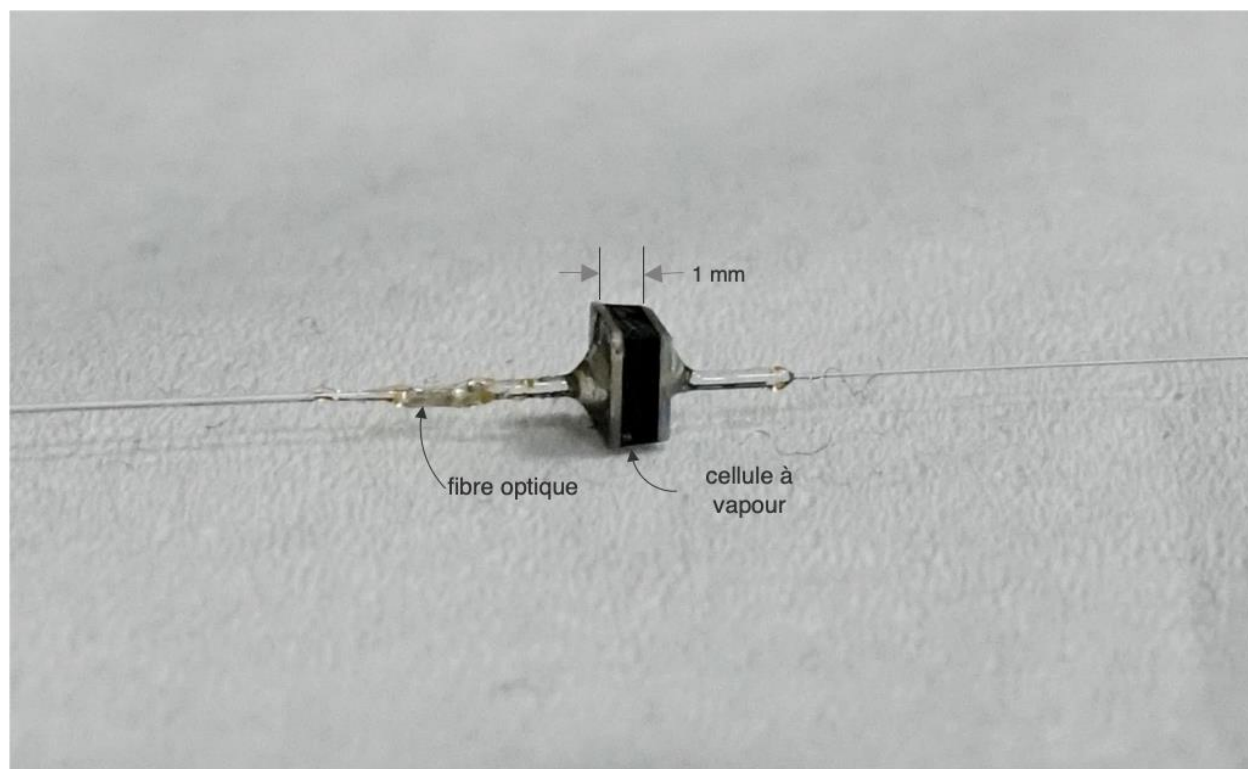


Figure 2: très petite cellule à vapeur construite à Quantum Valley Ideas Lab au Canada

Les capteurs d'atomes de Rydberg peuvent être extrêmement petits, de l'ordre de 500 microns. Les implémentations réelles d'Ideas Lab ont aujourd'hui un volume d'environ 1 millimètre cube et sont connectées par une fibre optique pour transporter les signaux à la fois pour exciter les atomes de Rydberg dans le capteur et pour transporter les informations du capteur vers

l'unité d'interface et éventuellement l'affichage des informations. En raison du couplage optique des signaux, le système est assez bien protégé contre les interférences provenant de sources fortes et proches d'émissions de radiofréquences.

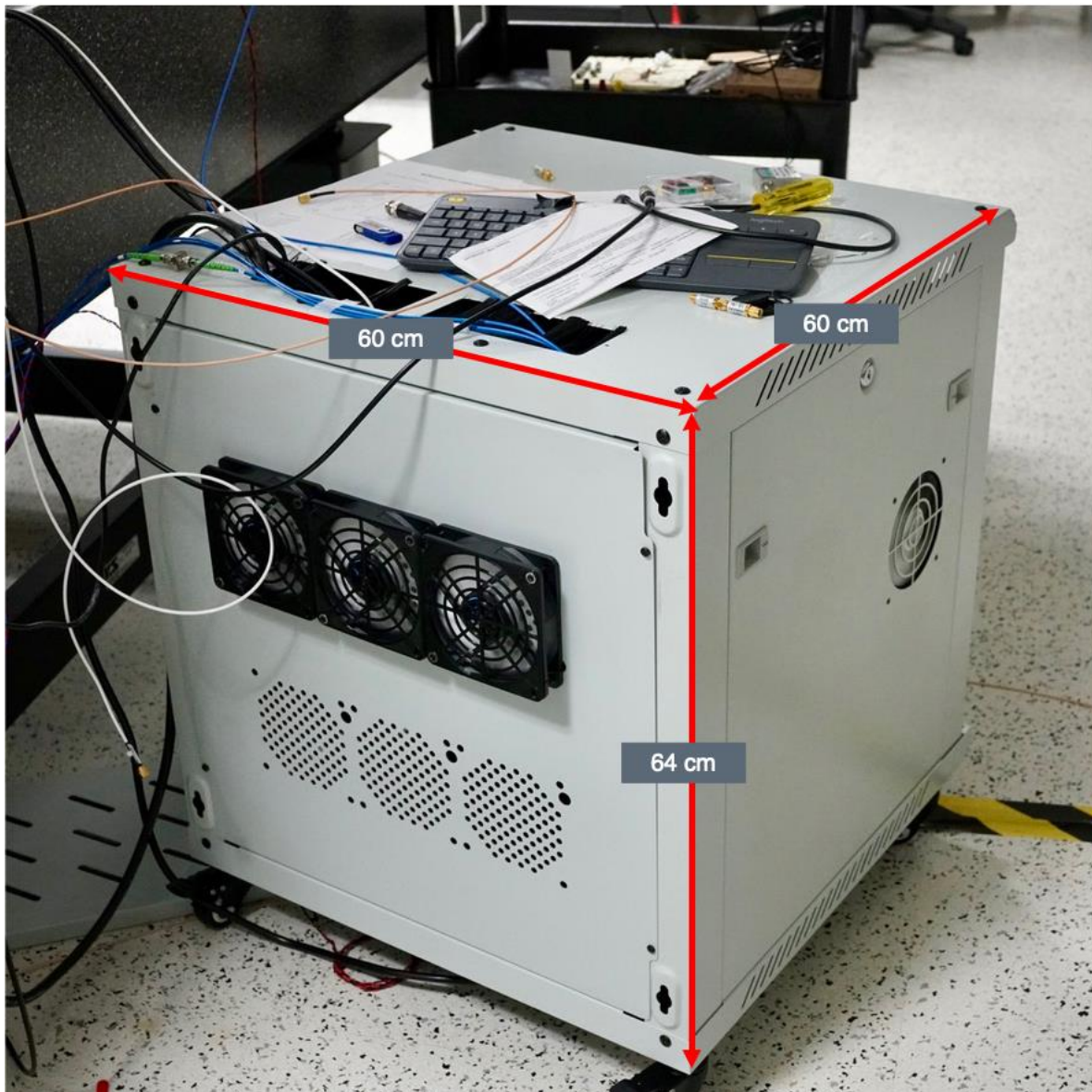


Figure 3 : Le preuve de concept fabriqué au Idea Lab - c'est assez petit par rapport la première version.

Résumé

La mise en œuvre des capteurs quantiques atomiques de Rydberg est une méthode émergente, mais pratique, pour la détection et la cartographie précises des champs de radiofréquence d'une onde millimétrique à une gamme de fréquences Téra hertz. La technologie a récemment été rendue pratique par des découvertes dans les domaines de la mise en œuvre de cellules à vapeur, des algorithmes avancés de contrôle laser et du traitement numérique du signal des signaux résultants.

Un certain nombre d'avantages pratiques existent, notamment les suivants:

- Haute sensibilité aux champs radiofréquences
- Construction diélectrique - empêche la perturbation d'autres champs électromagnétiques
- Couplage optique - résistant aux interférences d'autres sources radiofréquences

- Capacité à résoudre la phase et la polarisation des signaux
- Résolution spatiale très élevée - capacité à effectuer une cartographie de champ haute résolution
- Auto-calibrage pour la puissance des signaux reçus
- Taille extrêmement petite possible - moins de 1 millimètre cube de volume possible aujourd'hui

Si vous exigez plus d'informations, contactez: Mark Pecen, Quantum Valley Ideas Lab, CANADA mpecen@qvil.ca

Annexe – plus des détails

Les atomes de Rydberg sont des atomes hautement excités d'un matériau, tel que le césium, dans lequel un ou plusieurs électrons auraient un nombre quantique principal très élevé. Plus ce nombre quantique est élevé, plus le (ou les) électrons sont éloignés du noyau. Cela fait que les atomes de Rydberg ont une réponse exagérée aux champs électriques et magnétiques, ce qui est la propriété qui nous permet de mettre en œuvre des capteurs radiofréquences.

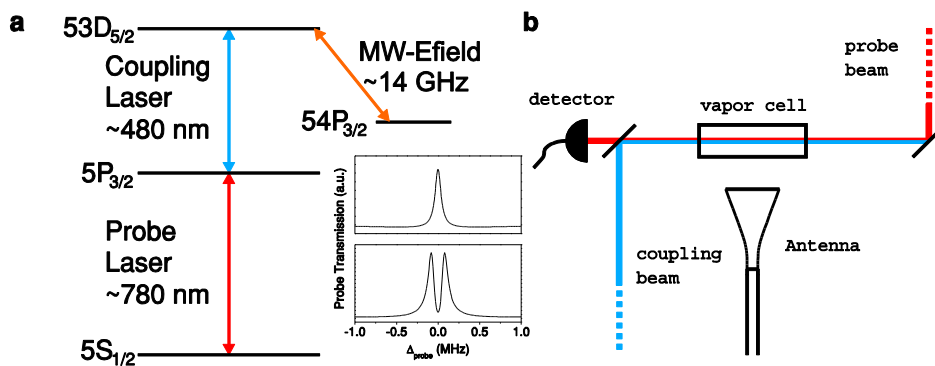


Figure 4 a) Exemple de structure de niveau d'énergie atomique pour une mesure utilisant rubidium. Les lasers sont tous des lasers à diode. La transmission du laser sonde en présence du laser de couplage est enregistrée. Si le champ radiofréquence est absent, un pic de transmission de sonde étroit est observé lorsque le laser traverse le gaz où la sonde serait normalement absorbée, graphique supérieur en (a).

Le capteur quantique à base d'atomes de Rydberg fonctionne en configurant chaque atome de l'échantillon pour qu'il fonctionne comme un interféromètre utilisant la lumière, de sorte que la transmission à travers un échantillon atomique soit sensible au champ appliqué. La mesure est proportionnelle aux constantes fondamentales et aux propriétés de l'atome, qui ont été déterminées par des mesures de précision en laboratoire. Cet interféromètre atomique excite un échantillon atomique en utilisant la lumière cohérente d'un laser. Cette énergie du laser divise le spectre, produisant une sortie mesurable qui est proportionnelle aux propriétés physiques de base des atomes excités. Cette division spectrale, $\Delta\nu$, provoquée par le rayonnement radiofréquence incident d'une interférence quantique générée optiquement est idéalement proportionnelle à l'amplitude du rayonnement incident, E_0 . Les facteurs de proportionnalité dépendent uniquement du moment électrique dipolaire de transition, μ_{RF} , de la transition atomique et de la constante de Planck, h ,

$$E_0 = \frac{h \Delta\nu}{\mu_{RF}},$$

voir figure 4. Le gaz atomique est contenu dans une petite cavité diélectrique qui perturbe le moins possible le champ de rayonnement incident.