



radiogoniométrie

retrouver les capteurs météo sans fil égarés

Prototype de radiogoniomètre.

Rolf Hase (Allemagne)

Si plusieurs de ces capteurs sont disposés au voisinage d'une station météorologique, au fil du temps il devient parfois difficile d'en localiser un ou plusieurs. Peut-être sont-ils envahis par la végétation ou avez-vous oublié où vous les aviez placés. Ce projet peut vous aider. La radiogoniométrie permet de localiser des capteurs sans fil.

Une bonne station météorologique mesure température, humidité et pression de l'air et fournit aussi des prévisions plus ou moins fiables sur l'évolution des conditions météo. Pour cela, il faut aussi mesurer direction et vitesse du vent, quantité et durée des précipitations, éclaircissement solaire et autres paramètres, tous évalués par le logiciel du microcontrôleur sophistiqué de la station météo. Cela met en œuvre un grand nombre de capteurs spécialisés dits *connect & forget* (connectez et oubliez) généralement reliés par radio à la station météo. Nous verrons ici les modules 433 MHz.

Afin d'utiliser la radiogoniométrie (RDF = Radio direction finding) pour localiser un capteur météo égaré, il faut d'abord savoir comment fonctionne une

station météo. Il ne s'agit pas d'apprendre les séquences d'impulsions spécifiques d'une marque, mais plutôt d'avoir une idée du trafic de données. En dehors des codes Manchester et Ethernet, il y a peu de façons de transmettre un paquet de bits série et le logiciel rtl_433 [1] permet facilement de décoder le trafic de données de tout capteur, même si le logiciel est conçu pour toute une gamme de fréquences. Il existe en ligne une version compilée, limitée à 433 MHz.

Principes de base

La fréquence d'émission d'une station météo se situe dans une bande dite ISM (industrielle, scientifique et médicale) à 433,92 MHz ou 868 MHz, stabilisée par un résonateur. C'est là que le bât blesse : tous

les émetteurs du voisinage - les vôtres et ceux de vos voisins - exploitent l'une de ces fréquences ou les deux. Ces capteurs, généralement alimentés par deux piles AA, rayonnent une puissance de l'ordre du mW et fonctionnent avec un très faible rapport cyclique, c'est pourquoi ils consomment très peu. Un à trois paquets de données sont envoyés, espacés de très longs intervalles, 44 s dans notre cas (**figure 1**). Le calage temporel est très précis, puisque même la station météo la plus simple a la précision d'une horloge à quartz.

Un amateur ou un fabricant astucieux pourra donner la priorité à son propre capteur grâce à un interrupteur DIL inséré dans la ligne d'alimentation positive du récepteur. En enfonçant le bouton droit pendant deux à trois secondes, la station météo passe en mode recherche, et le récepteur est alimenté en continu pendant deux à trois minutes (nous y reviendrons plus tard). L'icône du récepteur clignote en mode recherche. Dès que votre capteur est détecté, appuyez sur l'interrupteur DIL. Ainsi, votre capteur est le seul à être marqué dans le registre temporel. Une fois le mode recherche terminé, remettez l'appareil sous tension et tout fonctionnera comme d'habitude pendant une longue durée.

Le fonctionnement à faible consommation est aussi important pour les récepteurs des stations météo (sur pile pour la plupart). Elles exploitent la grande précision temporelle des transmissions récurrentes de paquets de données en allumant le récepteur au bon moment, à l'aide d'un signal de commutation. Si on tient un récepteur à large bande (par ex. un bon vieux ICOM PCR1000 [2]) près du récepteur, on entend le bruit du récepteur super-réaction (également appelé récepteur reflex) qui se met en marche juste avant l'arrivée du paquet de données. Les performances des semi-conducteurs modernes permettent le mode super-réaction même en bande UHF. Le bruit du PCR1000 provient du gain élevé obtenu en alternant entre l'oscillation et le blocage. Les récepteurs superhétérodynes (superhet) sont aussi utilisés dans ce domaine. Avec -112 dBm, leur sensibilité est meilleure que celle d'un récepteur simple d'environ 6 dBm. J'arrête ici mon exposé sur les stations météorologiques, la radiofréquence et l'électronique, pour aborder la radiogoniométrie.

De l'idée...

La situation initiale est la suivante : capteur et station météo fonctionnent correctement, mais nous ne retrouvons pas le capteur. Un oscilloscope avec déclenchement numérique performant (par ex. mon PicoScope, acheté dans la boutique Elektor) sera d'une grande aide dans ce domaine. Comme récepteur goniométrique, j'ai utilisé un superhet compact Aural RX 4MM5 [3]. Pour les 1er essais d'enregistrement de paquets de données pertinents, une courte antenne (environ 16 cm de long) reliée au récepteur superhet et placée en hauteur au-dessus du reste du matériel suffit. Observez les instructions de la fiche technique : pour la masse prenez comme point de départ de soudage soit un petit morceau de circuit imprimé, soit des fils de section assez forte. Beaucoup d'autres types de récepteurs superhet testés par l'auteur ont des oscillations persistantes incontrôlables.

Pour l'orientation initiale, j'ai ajouté une sortie d'écouteur, (résistance de 470 Ω + petit condensateur chimique) à la sortie d'impulsion (broche 14 du RX

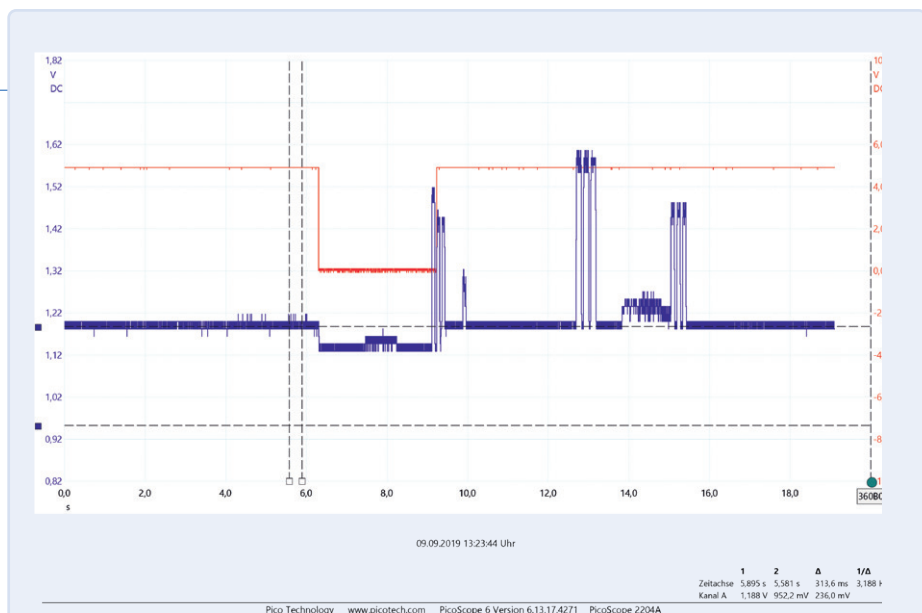


Figure 1. La bande 433 MHz est très occupée. Les signaux de différents modules d'émission sont représentés ici. La séquence d'impulsions centrale est celle que nous voulons.



Figure 2. Le timing est critique pour sélectionner l'impulsion centrale.

4MM5). Parallèlement à cela, j'ai tout suivi sur le PCR1000, aussi à l'aide d'une antenne filaire courte de 16 cm de long. L'oscilloscope doit être réglé en mode déclenchement monocoup, car c'est la seule façon de déclencher sur l'événement souhaité (la séquence d'impulsions pertinente). Afin de filtrer le paquet de données correct, j'ai réinitialisé la station météo réceptrice en retirant et réinsérant la batterie car cela lance automatiquement la recherche du capteur. Puis la station météo affiche très vite une valeur valide (dès qu'elle provient du capteur) et son timing devrait également correspondre au signal sur l'oscillo si aucun autre signal n'interfère.

Les durées d'impulsion et de pause du paquet peuvent être lues sur l'écran de l'oscillo (**figure 2**, prise sur le dispositif déjà terminé). La durée du paquet en question est de 321 ms, tandis qu'un autre paquet avait une durée de 340 ms. Cette procédure relativement chronophage, est faisable, et évite de chercher un numéro d'identification dans les impulsions. Les temps déterminés de cette manière ne changeront plus, et ils ont été intégrés au logiciel du radiogoniomètre. La forme d'onde montre également la baisse du niveau du signal due à la commutation de l'antenne par les diodes PIN (nous y reviendrons plus tard). La vaste plage

dynamique de la mesure réduit diverses erreurs se produisant inévitablement en radiogoniométrie manuelle. La transition numérique L/H de la trace rouge supérieure de la **figure 1** indique que l'Arduino a reconnu l'impulsion correcte (celle du milieu) ainsi que la rupture d'impulsion et, a mesuré peu après, le niveau de la deuxième impulsion, indiqué sur la ligne inférieure de l'écran. L'évaluation du niveau du signal comporte un risque d'erreur car le filtre passe-bas produit un front de signal qui, selon la force du signal (proximité de l'émetteur) et la valeur du seuil, influence le temps que l'Arduino utilise comme critère d'évaluation. Toutefois, la méthode s'est avérée fiable. On pourrait aussi mesurer la durée du signal de données (les impulsions déclenchées) avec un circuit *sample-and-hold*, mais cela impliquerait de calculer des constantes de temps.

Comme je ne voulais pas m'épuiser comme les participants à une chasse au renard (voir encadré), j'ai préféré utiliser un servomoteur pour faire tourner le goniomètre. De là, il n'y aurait plus qu'un petit pas à franchir pour tout automatiser.

Cependant, le développement d'un appareil utilisable s'est avéré assez difficile. En effet, en raison de sa bande passante étroite, j'ai d'abord construit une antenne Yagi de 70 cm à six éléments filaires et effectué des tests dans le jardin. En raison des longs intervalles entre signaux, les essais prirent beaucoup de temps et ne furent pas très utiles. Une réalisation similaire à celle d'un récepteur de chasse au renard [4][5] est en fait préférable : appareil séparé, tenu à la main, avec boîtier étanche aux RF et alimentation électrique autonome, sans câble gênant pouvant modifier le champ RF en cas de déplacement. En outre, pour une utilisation réelle dans une station météo, l'oscillo a une tâche difficile : il doit capturer le signal correct (très bref) toutes les 44 secondes parmi de nombreux autres signaux et maintenir le niveau du signal assez constant, malgré de grandes fluctuations. C'est sans espoir, et l'utilisation d'un servomoteur pilotant automatiquement la ou les antennes est la seule alternative.

...au circuit

Les livres comme *Rothammel's Antenna Book* d'Alois Krischke montrent de beaux

diagrammes d'antenne. Pour les reproduire, il faut des conditions de champ libre idéales et un équipement de test précis. Dans notre cas, seul l'angle correspondant au minimum de signal importe et non l'exactitude de la valeur du signal. De plus, vous ne voulez pas inonder le voisinage d'émissions continues. Pour la mesure approximative de la caractéristique directionnelle, j'ai placé aussi loin que possible de ma maison (7 à 8 m) un petit module émetteur à résonateur bon marché (à cette fin, on peut aussi utiliser brièvement une télécommande de prise de courant sans fil à 433,92 MHz dont on tient le bouton enfoncé).

Côté récepteur, j'ai utilisé un potentiomètre de contrôle proportionnel de l'angle du servo (nécessaire pour les tests dynamiques de la mécanique de rotation) et un rapporteur pour enregistrer le diagramme d'antenne au pas de 30 degrés. Pour cela, j'ai chargé les programmes de contrôle adéquats.

Fort de ces essais, j'ai mis au point un récepteur goniométrique composé des éléments ci-dessous (voir le schéma, **figure 3**).

Les deux **antennes $\lambda/4$** disposées orthogonalement (en L). Les diodes PIN font en sorte que les deux antennes ne soient jamais allumées en même temps, et qu'elles s'influencent le moins possible.

Si un **filtrage** est nécessaire, un filtre T passe-bas (absent du schéma du circuit) composé de deux bobines à air en fil de cuivre argenté (trois tours sur un gabarit de 3 mm) et d'un condensateur de 2,2 pF peut être connecté directement à chaque antenne. Un circuit imprimé est ici idéal : il permet de construire un module compact, de faible hauteur, avec bornes d'antenne et diodes PIN. Les condensateurs servent de points de soudure.

Le module récepteur superhet RX 4MM5 reçoit les signaux des antennes et émet, entre autres, l'intensité du signal (RSSI). Ce signal analogique, compris entre 1,2 V (à -120 dBm) à 2,2 V (à -30 dBm) environ, est le seul signal utilisé. Il est lissé par un filtre passe-bas (3,3 k Ω / 1 μ F) et envoyé à l'entrée analogique AO de l'Arduino.

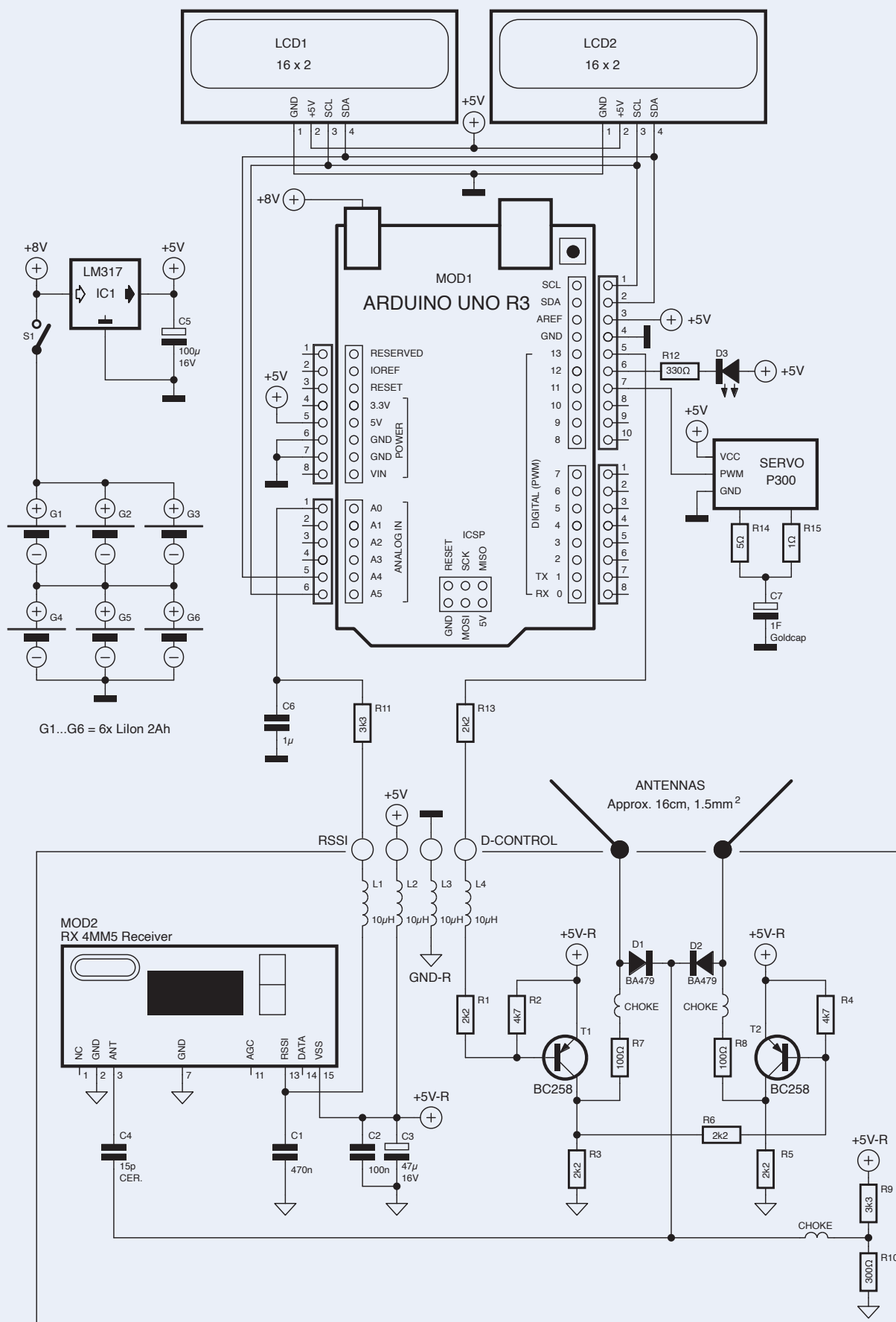
L'**Arduino** effectue trois tâches : Il évalue le signal RSSI filtré du récepteur et affiche le résultat sur deux modules d'affichage 16x2 ; il allume les deux antennes indivi-

duellement ; il pilote le servo aux positions de mesure voulues.

Le servo couvre environ 180 degrés en six pas de 30 degrés chacun, en partant de la gauche, pour un total de sept points de mesure. Si un paquet de données valide est détecté, la mesure de la première impulsion, correspondant à l'antenne de gauche, s'affiche sur la 1^{ère} ligne de l'écran de gauche. Avant la 2^e impulsion du même paquet de trois impulsions, l'antenne droite est activée par les diodes PIN, puis la valeur de cette 2^e impulsion est mesurée après un temps de stabilisation de quelques ms et affichée sur la 2^e ligne de l'écran. Puis le servo tourne de 30° et attend le paquet de données suivant. Le minimum des valeurs mesurées donne la direction vers l'émetteur, comme on le verra plus en détail ci-dessous. L'écran et le potentiomètre de droite et la plaque d'essai, sont destinés au diagnostic et à une étude plus détaillée (par ex. contrôle du servo avec le potentiomètre dans les 1^{ères} étapes du développement).

Comme prévisible, le minimum est approximativement perpendiculaire à l'orientation apparente des deux antennes, qui sont disposées à 90° l'une par rapport à l'autre, comme on peut le voir sur le prototype. Bien que les antennes soient isolées par les diodes BA479, à un certain angle, celle de gauche agit comme un directeur pour celle de droite (conformément à la théorie des antennes Yagi avec un ou plusieurs directeurs, un dipôle et un réflecteur), mais étant trop longue, elle agit plutôt comme un réflecteur et atténue le signal dans cette direction. Cela se voit bien sur l'écran (**figure 4**), où la direction visuelle de l'antenne pointe vers la position déjà connue d'un capteur météo situé à environ 5 m de distance. De gauche à droite, les trois paires de valeurs sont : 4 : 50/43, 5 : 47/34 et 6 : 51/46. En particulier, la valeur 34 pour l'antenne droite (2^e ligne de l'écran), alors « masquée » par l'antenne gauche dans cette position, montre bien cet effet. L'orientation est donc clairement définie. Un autre critère est l'amplitude des valeurs : l'intensité du champ diminue comme le carré de la distance (car la surface de propagation augmente selon la même loi).

Pour être autonome, le récepteur goniométrique est alimenté par six batteries



200636-008

Figure 3. Schéma du circuit du récepteur goniométrique. -R : côté récepteur ; self $\lambda/4$: 16 cm de fil de cuivre de 0,2 mm sur gabarit de 3 mm. Connexion au module d'antenne rotatif : Câble ruban flexible à 14 voies, 50 cm ($3 \times \lambda/4$). BA479 : Diode PIN.

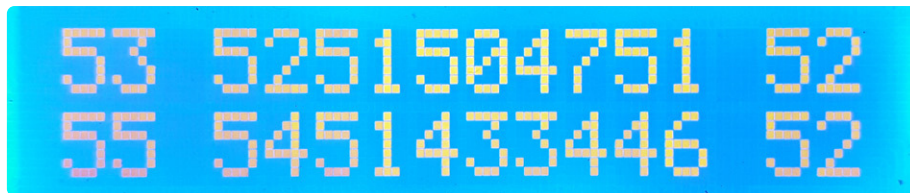


Figure 4. Lectures sur l'écran.

lithium-ion (deux jeux de trois connectés en série). La tension de sortie des piles est abaissée à 5 V par un régulateur de tension fixe (LM317) pour alimenter l'électronique. Notons que l'alimentation du circuit d'antenne doit être prise directement sur la broche 15 du module récepteur.

Tâches logicielles

Quiconque (comme moi) a beaucoup programmé en assembleur (logiciel très proche du matériel informatique et où les considérations de temps réel sont peu contraignantes) a des doutes quant à la capacité d'un langage de plus haut niveau, comme la variante C pour Arduino, à fonctionner en temps réel si le temps est critique. Tout semble plus simple, mais les langages de haut niveau ont des conventions internes qu'il faut connaître ou apprendre empiriquement.

La partie initialisation du croquis [6] se passe d'explication supplémentaire. La valeur du seuil `y` est définie et peut nécessiter d'être modifiée. L'Arduino nécessite quelques secondes pour se stabiliser en température, c'est un paramètre notable. Contrairement à l'ESP32, dont les mesures analogiques sont des estimations, l'Atmel ATmega328 possède un convertisseur A/N précis, qui est utilisé ici. La valeur analogique est lue au début de la boucle principale `loop()`. Deux routines sont à l'œuvre : `MessWert` et `TestWert`. Elles ne diffèrent que par le nombre de mesures en fonction du temps disponible. La longueur de l'impulsion haute est mesurée après élimination des rebonds. À cet effet, la fonction `millis()`, mesure la différence de temps. La valeur initiale doit donc être sauvegardée. Comme pour les mesures à l'oscilloscope, la durée de l'impulsion High être entre 63 et 76 ms. Si cette condition est remplie, l'indicateur `Block1` est mis à 1. Puis vient la mesure du temps de pause. Si le temps total est compris entre 117 et 127 ms, le capteur concerné a été trouvé et le `Block1` est mis à 2. Après un temps d'attente pour le front montant de la 2e impulsion (`delay(20)`), `Wert2` est déterminé sans bouger l'antenne et écrit sur la

2e ligne de l'écran, sous `Wert1`. Le reste est simple. Le paramètre `k` peut adresser les sept positions de l'écran LCD au plus jusqu'à la 37e seconde, ou si la distance est suffisante jusqu'à la 44e seconde, où a lieu la mesure suivante du paquet de données du capteur.

La question de savoir si l'Arduino peut gérer des tâches en temps réel peut précisément être résolue dans le logiciel avec cet arrangement de boucles `while` et `for`. Toutefois, j'ai dû numéroté les boucles au fur et à mesure, sinon au bout de 10 boucles, je perdais le fil. En attente de l'impulsion, le logiciel ne doit rien faire d'autre qu'attendre. En particulier, la commande de l'écran nécessite près de 20 ms, et ce n'est bien sûr pas possible lors des 75 ms d'une impulsion ni des 50 ms d'une pause. Cependant, après la détection d'un paquet de données, le canal reste silencieux pendant 44 s. C'est plus que suffisant.

Les temps d'impulsion et de pause relatifs sont sondés avec une certaine tolérance. Le seuil de déclenchement de l'impulsion est aussi important. Il est géré avec la moyenne sur une durée raisonnable. Comme dit ci-dessus, tout fonctionne exactement comme programmé ici. Soyez prudent si vous apportez des modifications autres que les paramètres numériques des impulsions, à moins de conserver la structure de la boucle. Certains des programmes auxiliaires que j'ai trouvés en ligne et modifiés, par ex. pour le servo, sont inclus dans le téléchargement de cet article [6] et vous pouvez les utiliser pour vos expériences.

Compartiments

Pour les radiogoniomètres le blindage est crucial, et le récepteur est en outre enfermé dans une tôle étamée pour le protéger des stations de base mobiles puissantes. J'ai construit beaucoup d'amplis et de convertisseurs RF utilisant des cartes imprimées (CI) logées dans des compartiments cloisonnés. Cette expérience m'a été utile ici. J'ai découpé les morceaux de CI à la taille du boîtier de connexion de l'antenne et je les ai soudées en place, avec des compartiments

intermédiaires pour les étages d'amplification disposés aussi près de l'antenne que possible. La fiche technique du récepteur superhet recommande un grand plan de masse, je l'ai donc monté sur un morceau de CI. Si vous n'avez pas d'expérience des lignes à bande (striplines), vous aurez du mal à travailler les pistes de CI dans la gamme UHF.

Le tout forme une unité compacte, de sorte qu'un blindage du compartiment interne est inutile et que seul l'ensemble du récepteur est blindé en l'enfermant dans une tôle soudée. La construction ou l'exploitation autonome du module, par ex. dans une station météorologique, n'est possible que si les liaisons de masse aux broches sont courtes et pas trop fines, au besoin découpées par des condensateurs.

Pour les raisons évoquées précédemment, la structure mécanique doit être aussi autonome que possible. L'alimentation est assurée par six piles lithium-ion standard. C'est plus que suffisant sur le plan électrique, mais cela garantit sa fiabilité et sa résistance. J'ai fixé un pilier carré à une planche servant de base et j'ai monté une boîte en bakélite au sommet du pilier. Elle abrite les piles, la carte Arduino et j'ai positionné le servo au milieu. Au-dessus du servo, j'ai monté un morceau de tôle supportant un petit roulement à billes pour tige filetée M4. Le récepteur est fixé à l'aide d'une petite équerre à l'extrémité supérieure de cette tige. La connexion électrique au récepteur est assurée par une nappe de câble ruban à 14 voies, à suspension élastique, d'une longueur d'environ 50 cm. Cela fait $3 \times \lambda/4$ et aide les selfs de 10 μ H installées dans toutes les lignes d'alimentation du récepteur.

Il n'est pas indispensable d'avoir autant de fils de connexion que sur l'illustration en tête d'article car tous les fils des signaux et d'alimentation ont un fil de terre de chaque côté. Cela fournit un bon blindage et n'est que légèrement moins bon qu'un coaxial. J'ai initialement installé un servo miniature parce que l'antenne assemblée tournait sans effort. Ce fut une erreur, car l'inertie n'était pas prise en compte. Le servo, dont

le moteur est entraîné par un circuit en pont, n'émet aucun bruit et délivre toute sa puissance dès sa mise en marche, et... le petit réducteur s'est usé très rapidement. Heureusement, j'avais un servo de type PS300 avec un couple plus élevé en réserve. On vit et on apprend ! Par sécurité, j'ai d'emblée monté un réseau RC T dans le fil du moteur, composé de deux résistances ($1\ \Omega$ et $5\ \Omega$) et de deux goldcaps pour un total de $1\ \text{F}$, cela donne un démarrage progressif sur 1 s. En outre, j'ai découpé une rondelle de caoutchouc dans une chambre à air de vélo et je l'ai vissée sur le support. La tige filetée est entraînée par cette rondelle, ce qui atténue les saccades. Cela a résolu le problème de l'inertie.

Au sujet de la radiogoniométrie dans le monde des radioamateurs, je me dois de mentionner le goniomètre dit de Spandau. Il est toujours disponible chez Funkamateure.de [7]. Dans la gamme VHF, il est utilisé avec plus d'antennes reliées entre elles que cela ne serait approprié ici. Durant la guerre froide, Berlin-Ouest utilisait le goniomètre Spandau pour traquer les espions de la Stasi. Il va de soi qu'à l'époque personne ne se souciait d'avoir un très faible rapport cyclique (comme celui des capteurs météo : 400 ms en 44 s). Sur le plan technique, qui ne connaît pas de limite supérieure, le couplage des deux méthodes à l'aide de diodes de commutation BA479 serait certainement concevable. ◀

200636-04 – VF : Yves Georges

Le radioamateur ordinaire

Qui va à la chasse au renard dans les champs, les bois et les prairies ? C'est le radioamateur sportif, un vrai athlète !



(photo de K. Theurich de Funkamateure 9/88, avec l'aimable autorisation de la rédaction Funkamateure)

Impossible d'alléguer que le radioamateur commun (*imperitus scintillae vulgaris*) vit en ermite dans sa cabane radio, casque sur les oreilles pour écouter des gazouillis distordus et bruyants et ne se sustente que de pizzas tièdes et de boissons sucrées. Un observateur attentif peut en effet parfois apercevoir se déplaçant dans les champs et rampant dans les sous-bois des

silhouettes aux couleurs vives qui exhibent d'étranges engins métalliques tubulaires.

Pourquoi les radioamateurs ont-ils de tels rites ? Est-ce une quête collective de nourriture, ou bien une parade rituelle de séduction ?

No, none of that. These radio amateurs are engaged in fox hunting, which doesn't mean they're shooting at innocent creatures. Instead, they're participating in a peaceful radio sport, or more formally, amateur radio direction-finding in the terminology of the DARC. This involves using a lightweight portable receiver, together with a map and compass, to track down transmitters hidden in the terrain, usually operating in the 80 m band (3.579 MHz) or — more difficult — in the 2 m band (144.5 MHz). This may be a friendly recreational activity for people of all ages, but (especially in Eastern Europe) there are also serious and strenuous competitions ranging all the way up to world championships. For descriptions and more information, see [5].

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (rolf.hase@arcor.de) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



PRODUITS

➤ **Arduino Uno Rev3 (SKU 15877)**
www.elektor.fr/15877

➤ **Oscilloscope USB PicoScope 2204A (10 MHz) (SKU 17303)**
www.elektor.fr/17303



LIENS

[1] rtl_433 sur GitHub : https://github.com/merbanan/rtl_433

[2] IC-PCR1000 : www.funkamateure.de/typenblaetter-1.html?file=tl_files/downloads/typenblaetter/frei/IC-PCR1000_typ.pdf

[3] RX 4MM5 : www.velleman.eu/downloads/7/rx4mm5_usersmanual.pdf

[4] À propos de la « chasse au renard » : https://fr.wikipedia.org/wiki/Radiogoniom%C3%A9trie_sportive

[5] Qu'est-ce que l'ARDF ? (allemand) : <https://ardf.darc.de/pubrel/wasist.htm>

[6] Téléchargements pour cet article : www.elektormagazine.fr/200636-04

[7] Le goniomètre de Spandau, « Funkamateure » 9-11/2011 (allemand) : www.box73.de/product_info.php?products_id=2503