

Odbiór fal radiowych ELF-VLF

Większości z nas wydaje się, że zakres częstotliwości radiowych, na których możemy przeprowadzać nasłuchy, zaczyna się od fal długich. W tym artykule chciałbym pokazać, że istnieje szereg sygnałów radiowych na częstotliwościach nawet poniżej 20kHz, pochodzenia zarówno naturalnego, jak i wynikających z działania ludzi, celowego (nadajniki radiowe) jak i niecelowego (zakłócenia przemysłowe). Chodzi więc o zakres częstotliwości, które nazywamy akustycznymi, ale nie o sygnały akustyczne, czyli wibracje powietrza czy innych ośrodków. W tym przypadku chodzi o zmienne sygnały elektromagnetyczne o bardzo niskich częstotliwościach. Odbiór takich sygnałów okazuje się bardzo interesujący, także dla hobbystów. Artykuł ten opisuje techniki odbioru na bardzo niskich częstotliwościach, a odbierane fale nazywa się falami ekstremalnie długimi – ELF (*Extremely low frequency*), superdługimi – SLF (*Super low frequency*), ultra – ULF (*Ultra low frequency*) i bardzo długimi – VLF (*Very low frequency*). W tabeli 1 przedstawiony jest umowny podział pasma radiowego.

Co ciekawe, układy do odbioru tych sygnałów są bardzo proste, a same układy nie wymagają strojenia i mogą być wykonane nawet przez zupełnie początkujących radioamatorów. Koszt części potrzebnych do wykonania odbiornika na zakres fal od ekstremalnie do bardzo długich jest bardzo niski, a sam układ nie przypomina tradycyjnego odbiornika radiowego. Eksperymentalny układ takiego odbiornika pokazano na fotografii 1.

Pewną ciekawostką jest również sam sposób odbioru sygnałów: odebranych sygnałów nie słucha się, tylko ogląda na ekranie komputera i analizuje się ich widmo częstotliwościowe za pomocą odpowiedniego oprogramowania z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera. Analizowany przez nas sygnał oglądamy w postaci histogramu, na którym widzimy siłę sygnału kodowaną za pomocą barwy, jego częstotliwość i czas wystąpienia. Przykładowe dwa histogramy pokazane są na rysunku 2.

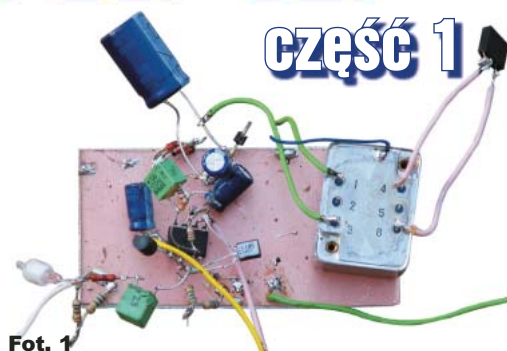
Sygnały radiowe

Otto Schumann, niemiecki fizyk, zauważył w 1952 roku, że Ziemia wraz z atmosferą może być potraktowana jako swego rodzaju „system elektromagnetyczny”, składający się z koncentrycznych powłok (warstw) o różnej przewodności. Sama Ziemia oraz wysoko umieszczona jonosfera (na wysokości 100–150 km nad ziemią) tworzą zewnętrzne warstwy o dużej przewodności, natomiast warstwa powietrza między nimi ma znikomą przewodność. Tworzy się w ten sposób typowy układ rezonatora wñkowego, który może magazynować energię elektromagnetyczną.

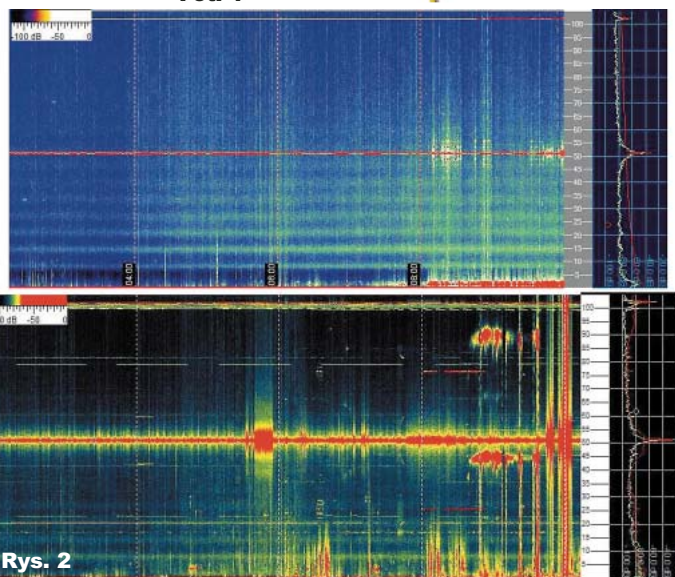
Energia ta pochodzi głównie od wyładowań elektrycznych w atmosferze (piorunów), których średnio na całym globie zdarza się ok. 100 na sekundę, zapewniając tym samym ciągle i stosunkowo płynne „ładowanie” rezonatora. Sygnały te, nazwane na cześć Otto Schumanna rezonansem Schumanna, usłyszymy na częstotliwościach około 7,8Hz, 13,8Hz, 19,7Hz, 25,7Hz i 31,7Hz. Ciekawostką jest fakt, że ich wystąpienie najpierw było przewidziane teoretycznie, a dopiero później zostało

potwierdzone doświadczalnie. Częstotliwości rezonansu Schumanna zawierają się w zakresie od 7,8 do około 60 herców z odstępem między sygnałami rzędu 6 herców. Ze wzrostem częstotliwości rezonansu Schumanna (tzw. modu) maleje siła sygnału, stąd najłatwiejsze do wykrycia są pierwsze cztery częstotliwości rezonansu. Obserwuje się niewielkie zmiany częstotliwości rezonansu Schumanna w ciągu doby na skutek zmian jonosfery. W zakresie do 40 Hz, na terenach aktywnych sejsmicznie, odbierane są sygnały radiowe występujące przed trzęsieniami ziemi, jednak odbiór tych sygnałów i wykorzystanie ich w celach ostrzegania przed trzęsieniami jest na razie na etapie badań. Na częstotliwości 50Hz usłyszymy wszechobecny przydźwięk sieciowy, jest to sygnał o zdecydowanie największej sile, z jakim się spotkamy. Oczywiście w widmie zobaczymy też szereg sygnałów będących jego wielokrotnościami – harmonicznymi. W innych częściach świata częstotliwość sieci energetycznej wynosi 60Hz. Częstotliwości 76Hz i 82Hz używane są przez systemy komunikacji z łodziami podwodnymi, odpowiednio Rosji i Stanów Zjednoczonych. Tak

niska częstotliwość pozwala nawet na komunikację z zanurzonymi okrętami podwodnymi znajdującymi się pod powierzchnią lodu. Kodowanie transmisji odbywa się w tym wypadku za pomocą zmian częstotliwości z szybkością paru znaków na minutę, przy czym cała transmisja jest skutecznie szyfrowana. W zakresie od 2kHz do 10kHz skupiona jest główna energia sygnałów radiowych pochodzących od wyładowań burzowych. Sygnał o



Fot. 1

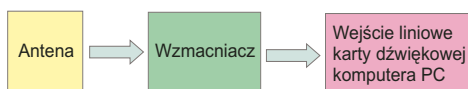


Rys. 2

częstotliwości około 8kHz dają urządzenia zasilania lamp wyładowczych, stosowanych w oświetleniu ulicznym. Powyżej częstotliwości 10kHz zobaczymy już szereg stacji radiowych. Na przykład na częstotliwościach 11,905kHz, 12,649kHz, 14,881kHz sygnały od systemu nawigacyjnego Alpha, a od 16 do 22kHz sygnały marynarek wojennych – w tym wypadku wykorzystuje się zarówno sygnały telegraficzne CW, jak i transmisji dalekopisowej RTTY, a cała transmisja oczywiście jest szyfrowana. Na częstotliwości 15625 Hz zobaczymy sygnały pochodzące od częstotliwości odchyłania poziomego telewizorów kineskopowych naszego systemu PAL (i SECAM).

Tabela 1

Skrót	Nazwa	Zakres częstotliwości	długość fali
subHz	Sub Hertz	<3Hz	>100000km
ELF	Extremely Low Frequency	3Hz - 30Hz	100000km - 10000km
SLF	Super Low Frequency	30Hz - 300Hz	10000km - 1000km
ULF	Ultra Low Frequency	300Hz - 3000Hz	1000km - 100km
VLF	Very Low Frequency	3kHz - 30kHz	100km - 10km
LF	Low Frequency	30kHz - 300kHz	10km - 1km
MF	Medium Frequency	300kHz - 3000kHz	1km - 100m
HF	High Frequency	3MHz - 30MHz	100m - 10m
VHF	Very High Frequency	30MHz - 300MHz	10m - 1m
UHF	Ultra High Frequency	300MHz - 3GHz	1m - 10cm
SHF	Super High Frequency	3GHz - 30GHz	10cm - 1cm
EHF	Extremely High Frequency	30GHz - 300GHz	1cm - 1mm



Rys. 3 Około 20 kHz możemy przeprowadzić pośrednią obserwację aktywności słońca, obserwując zmianę siły sygnałów odbieranych stacji radiowych. Wymaga to jednak długiego czasu uśredniania sygnału, aby usunąć wpływ modulacji i najłatwiejsze jest do zaobserwowania podczas wschodu lub zachodu słońca. Zmiany w sile odbieranego sygnału związane są w tym wypadku ze zmianami jonizacji dolnych warstw jonosfery, powstającymi pod wpływem działania słońca. Powyżej 20kHz możemy usłyszeć sygnały pochodzące od przetwornic zasilających świetlówki.

W górnej części rysunku 2 rezonans Schumanna zobaczymy jako dość szerokie pasy o zielonej barwie. Widać tu „szumana”, ale nie ma sygnałów komunikacji z łodziami podwodnymi. W dolnej części „szuman” widoczny jest znacznie słabiej, ale za to widać wyraźnie sygnały komunikacji z łodziami podwodnymi. Jako ciekawostkę podam fakt, że rezonans Schumanna potwierdzono doświadczalnie dzięki komputerowi z 6-bitowym lampowym przetwornikiem A/C, a transformację Fouriera też realizował komputer lampowy.

Zasięg odbioru sygnałów radiowych zależy od ich częstotliwości. Tłumienie sygnałów do częstotliwości około 100Hz jest dość małe, ale rośnie ze wzrostem częstotliwości. Rozchodzenie fal radiowych na częstotliwościach w zakresie kilkuset Hz do 8...9kHz charakteryzuje się na terenach nizinnych dużą zmiennością, wynoszącą od 10 do 15dB na dobę i do 25–30dB w cyklu rocznym (dla szerokości geograficznej Polski), co powoduje duże zmiany w poziomie odbieranego sygnału, które rejestrujemy jako zmiany poziomów szumu. Około 10kHz obserwujemy wyraźny wzrost zakłóceń, związany z silnym spadkiem tłumienia fal radiowych i występowaniem sygnałów pochodzących od wyładowań atmosferycznych. Powyżej 10 kHz szumy zmniejszają się. Sygnały o częstotliwościach kilkunastu kHz i wyższych są stabilniejsze, jednak ich siła zależy od pory dnia, obserwuje się wzrost siły rejestrowanych sygnałów w porze nocnej. Oczywiście są sygnały radiowe, których występowanie trudno przypisać konkretnemu urządzeniu. Silnym źródłem zakłóceń są np. silniki elektryczne.

Schemat blokowy układu do odbioru bardzo niskich częstotliwości pokazany jest na **rysunku 3**. Układ taki składa się z anteny odbiorczej, układu elektronicznego (stosunkowo prostego wzmacniacza) i komputera z kartą dźwiękową z odpowiednim oprogramowaniem. Zanim przejdziemy do szczegółów układu odbiorczego, omówmy wszystkie czynniki wpływające pozytywnie i negatywnie na odbiór tak niskich częstotliwości.

Miejsce odbioru

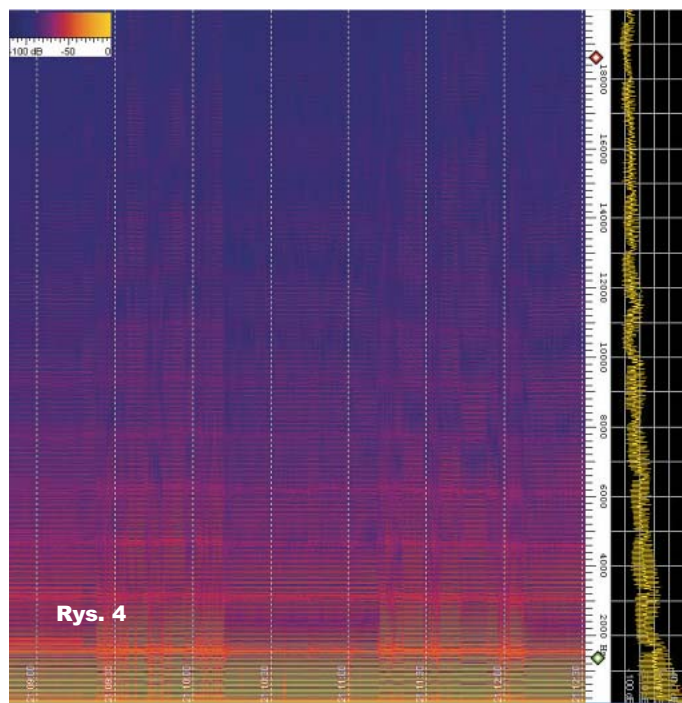
Lokalizacja stacji odbiorczej jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na powodzenie odbioru. Nie bez powodu stacje badawcze Pracowni Rezonansu Schumanna Uniwersytetu Jagiellońskiego umieszczone zostały gdzieś w głębi Bieszczad. Najlepsze efekty dają próby nasłuchów w terenach pozamiejskich, oddalonych od zakłóceń i smogu elektromagnetycznego. Wszelkie wyprawy terenowe z radiem typu SOTA (*Summits on the Air*), IOTA (*Islands on the Air*) czy zamkowe (nadawanie z terenu zamków) są dobrą okazją, żeby eksperymentować z nasłuchami na bardzo niskich częstotliwościach. Odległość od energetycznych linii zasilających powinna wynosić powyżej 50m. Poziom zakłóceń na tych częstotliwościach, związanych z działalnością ludzi, jest niezwykle wysoki i w warunkach miejskich praktycznie całkowicie uniemożliwia odbiór sygnałów ELF i SLF, takich jak rezonans Schumanna czy sygnały komunikacji z łodziami podwodnymi na częstotliwościach 76 i 82 Hz.

Przykładowy obraz zakłóceń miejskich pokazany jest na **rysunku 4**. Odbiór sygnałów w zakresie kilkunastu kHz jest już możliwy w warunkach miejskich, ale jest trudny. W warunkach miejskich możemy badać w zasadzie tylko poziom zakłóceń przemysłowych i sygnały od bliskich wyładowań elektrycznych (burz). Słuchając wyładowań elektrycznych w paśmie radiowym, mamy okazję poczuć się jak pionierzy radia, ponieważ pierwsze odbiorniki radiowe to były właśnie urządzenia wykrywające wyładowania elektryczne. Nasłuchy na tak niskich częstotliwościach są doskonałą podstawą, by zorganizować wycieczkę poza miasto, tym bardziej że sygnały możemy zarejestrować na komputerze, a ich analizę przeprowadzić dopiero w domu, w wolnym czasie. Do rejestracji i analizy danych wystarczy nawet starszy komputer przenośny (laptop).

Antena Marconiego

Ponieważ pole elektromagnetyczne ma składową elektryczną i magnetyczną, zasadniczo możemy zastosować dwa rodzaje anten do odbioru sygnałów radiowych:

- powszechnie znane anteny drutowe, reagujące głównie na składową elektryczną pola, których rodzajem jest antena Marconiego



Rys. 4

- anteny magnetyczne, reagujące na składową magnetyczną.

Zaletą anten reagujących na składową elektryczną jest prostota ich wykonania – funkcję anteny może pełnić kilkumetrowy kawałek drutu! Początkowo może dziwić fakt, że skuteczną anteną na tak niską częstotliwość można wykonać z kawałka drutu o długości kilku metrów. Dla częstotliwości 82Hz długość fali wynosi 3658,5km, a wiadomo że „tradycyjna” antena, by była skuteczna, powinna mieć rozmiar zbliżony do 1/4 długości fali. Wyjaśnieniem tego problemu jest analiza schematu zastępczego anteny o bardzo małej długości. Okazuje się, że krótki odcinek przewodu zachowuje się jak źródło napięciowe połączone szeregowo z kondensatorem o pojemności około 10pF na każdy metr długości anteny, przy czym rezystancja i indukcyjność jest pomijalna. Aby tak krótka antena była skuteczna, musi ona współpracować z układem o bardzo dużej rezystancji wejściowej i bardzo małej pojemności wejściowej, pojemność szeregową zależną od długości anteny wraz z rezystancją wejściową wzmacniacza działa bowiem jak filtr górno-przepustowy. Odpowiedni układ elektroniczny można zrealizować na kilka sposobów: można zastosować:

- wtórnik źródłowy na tranzystorze polowym,
- układ kaskodowy z tranzystorem polowym na wejściu
- niskosumowy wzmacniacz operacyjny o wysokiej impedancji wejściowej, pracujący w układzie wzmacniacza nieodwracającego.

Najczęściej używa się na tych częstotliwościach anten Marconiego typu L, T i asymetrycznych T.

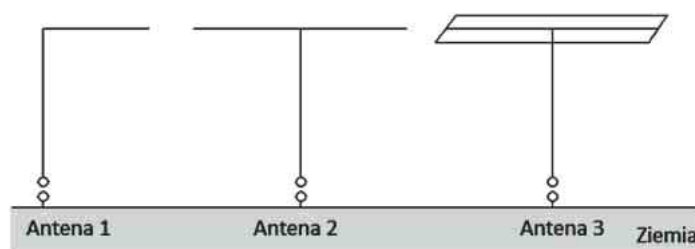
Ciąg dalszy na stronie 26

Ciąg dalszy ze strony 23

Długość anteny Marconiego jest znacznie mniejsza od długości obieranej fali. Nazwa anteny zależy od kształtu litery, którą antena przypomina. Ważną właściwością anten jest polaryzacja, mówiąca o tym, w jakiej płaszczyźnie względem ziemi dana antena najskuteczniej działa. Jeśli antena odbiera składową elektryczną promieniowania elektromagnetycznego prostopadłą do powierzchni ziemi, mówimy o polaryzacji pionowej anteny, natomiast gdy odbiera składową równoległą do powierzchni ziemi, mówimy o polaryzacji poziomej. Przykłady różnych anten Marconiego pokazano na **rysunku 5**. Antena 1 odbiera polaryzację pionową i poziomą, ponieważ zawiera pionowy i poziomy odcinek drutu. Antena 2 mająca równe oba ramiona poziome odbiera tylko sygnały o polaryzacji pionowej, ponieważ prądy w obu poziomych ramionach anteny mają przeciwne fazy i równe amplitudy, a więc wzajemnie się znoszą. W przypadku, gdy ramiona mają wyraźnie różną długość, otrzymujemy antenę typu asymetryczne T, która odbiera sygnały o obu polaryzacjach. Często stosuje się odmianną antenę Marconiego, która ma na swoim końcu, zawieszonym w powietrzu, poziomą płaszczyznę utworzoną przez drut, do którego podłącza się pionowy odcinek przewodu. Antena taka zachowuje się, jakby była dłuższa, niż jest w rzeczywistości – patrz antena 3. Płaszczyzna na wierzchołku anteny zachowuje się jak kondensator, którego jedną okładziną jest płaszczyzna utworzona przez drut, a drugą ziemia. W przypadku, gdy sygnał odbierany i antena mają tę samą polaryzację, mówimy o dopasowaniu polaryzacyjnym. Dopasowanie polaryzacyjne jest niezwykle ważne, ponieważ zmieniając polaryzację anteny, usłyszymy różne sygnały mimo braku zmiany częstotliwości, a tym samym możemy wyeliminować część niepożądanych sygnałów. Przykładowo za pomocą anteny o polaryzacji poziomej nie usły-

szymy rezonansu Schumanna. Wadą anteny Marconiego w porównaniu do anteny magnetycznej jest większy poziom sygnałów niepożądanych na wyjściu układu elektromagnetycznego współpracującego z anteną. Antena Marconiego ma

zdolność do zbierania ładunków statycznych i wymaga stosowania układów przeciwnapięciowych. Z drugiej strony, zaletą anteny Marconiego jest niezwykła prostota układu i niski koszt, sygnały rezonansu Schumanna możemy odebrać już na kilkumetrowej antenie. Anteny Marconiego, szczególnie te o dużych wymiarach i z płaszczyzną poziomą na górze anteny, „pracującą” jako kondensator, są wrażliwe na działanie wiatru, który powoduje zmiany pojemności tej anteny do ziemi. W przypadku anten reagujących na składową elektryczną pola elektromagnetycznego warunkami niesprzyjającymi są zatem wietrzne dni, przy małej wilgotności powietrza. Wiatr powoduje zakłócenia w paśmie z zakresu pojedynczych kiloherców. Podłączenie anteny nie powinno być wykonywane przez zbyt długi przewód koncentryczny, gdyż kabel taki trzeba traktować jako kondensator, którego okładzinami są z jednej strony żyła wewnętrzna, a z drugiej ekran kabla koncentrycznego. Ekran kabla koncentrycznego łączymy z ziemią za pomocą przewodu podłączonego z jednej strony do metalowego pręta wbitego w ziemię, a z drugiej strony do ekranu kabla koncentrycznego, w miejscu, w którym kabel koncentryczny jest blisko ziemi. Takie podłączenie anteny wydatnie zmniejsza poziom odbieranych zakłóceń oraz zwiększa skuteczność anteny i jest charakterystyczne dla anteny Marconiego. Antenę Marconiego może-



Rys. 5

my traktować jako kondensator o bardzo małej pojemności podłączonej do źródła napięciowego, więc podłączając długi kabel koncentryczny, uzyskamy pojemnościowy dzielnik napięcia o dużym stopniu podziału, który może całkowicie stłumić nasz sygnał odbierany. Długość kabla koncentrycznego nie powinna przekraczać 1/5 długości anteny Marconiego. Podczas burz odbiornik należy obowiązkowo odłączać od anteny, a samą antenę uziemić. Nieodłączenie anteny od wejścia odbiornika groziłoby uszkodzeniem od wyładowań elektrycznych zarówno odbiornika, jak i podłączonego do niego komputera, a nieuziemiaenie anteny groziłoby porażeniem prądem wyładowania elektrycznego osób znajdujących się w pobliżu. Wyładowanie elektryczne może przedostać się do komputera także przez przewód podłączony do ziemi. W przypadku rejestracji wyładowań burzowych znacznie lepiej używać kilkumetrowej anteny pionowej, niepodłączonej do uziemienia lub anteny magnetycznej. W tym wypadku wysoki poziom zakłóceń charakterystyczny dla anteny reagującej na składową elektryczną pola nieznacznie przeszkadza w odbiorze, gdyż siła sygnału jest wysoka, szczególnie w bliskim sąsiedztwie burz.

W drugiej części artykułu opisane będą inne rodzaje anten, a także wskazówki dotyczące zasilania i wykorzystania karty dźwiękowej komputera.

Rafał Orodziński
sq4avs@gmail.com