

25 lat minęło...

Przez ostatnie 25 lat w radiofonii zmieniła się technologia nadawania i odbioru. Przeszła ona z systemu analogowego na cyfrowy i to zarówno po stronie nadawczej (systemy DAB+, DRM), jak i w dziedzinie budowy oraz zasady działania odbiorników.

Radio wczoraj i dziś, czyli cyfryzacja radia

Ćwierć wieku temu w Polsce dominowały radioodbiorniki analogowe produkowane przez upadające zakłady należące do zrzeszenia Unitra, a dziś mamy dwusystemowe, przeważnie produkcji zachodniej (aczkolwiek opatrzone napisem „Made in China”) radioodbiorniki DAB+/FM.

Nieco historii

100 lat temu, czyli na początku rozwoju radia, były używane detektory kryształkowe składające się z podstawowych elementów: obwodu rezonansowego LC, detektora i słuchawek. Układy takie, współpracujące z długimi antenami drutowymi, jeszcze w okresie powojennym, umożliwiały odbiór lokalnej stacji nadawczej przy użyciu słuchawek. W Polsce na znacznej części terytorium możliwy był też odbiór nadawanego na falach długich programu pierwszego Polskiego

Radia. Przykład takiego radioodbiornika pokazano na **fotografii 1**.

Z chwilą wynalezienia lamp elektronowych powstały najpierw układy o bezpośrednim wzmacnieniu z użyciem wzmacniacza wielkiej częstotliwości (w.cz.) przed detektorem, co pozwoliło na odbiór dalekich stacji. Zastosowany po detektorze wzmacniacz małej częstotliwości (m.cz.) umożliwił odtwarzanie za pomocą głośnika. W okresie przedwojennym lampy elektronowe były na tyle drogie, że konstruktorzy dążyli w miarę możliwości do ograniczenia ich liczby i dzięki temu utrzymania ceny radioodbiornika na poziomie dostępnym dla szerszej rzeszy konsumentów. Z tego czasu pochodzą też takie rozwiązania, jak odbiorniki refleksowe, w których jedna i ta sama lampa służyła w funkcji wzmacniacza w.cz. i m.cz.

Znaczące zwiększenie czułości oraz selektywności odbiornika przy niewielkiej liczbie lamp zapewniło wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego (reakcji) i tak powstały odbiorniki reakcyjne. Oczywiście, były one wyposażone we wzmacniacze m.cz. i nieco rzadziej – także w.cz. Mimo to zarówno czułość takich odbiorników, jak i selektywność okazywały się w coraz większym stopniu niedostateczne w stosunku do potrzeb szybko zwiększającej się liczby stacji nadawczych i wzrastającego poziomu zakłóceń przemysłowych oraz powodowanych przez silniki samochodowe, a co najgorsze, również przez radioodbiorniki innych radiosłuchaczy. Niefachowa obsługa odbiorników powodowała częste przekraczanie progu wzbudzenia w trakcie ich przestrajania i odbiorniki stawały się wówczas generatorami wielkiej częstotliwości i to połączonymi bezpośrednio z anteną, czyli praktycznie zagłuszały sygnał radiowych innych odbiorców.

Po modyfikacjach tych układów powstały odbiorniki superreakcyjne, w których działanie odbiornika polega na tym, że w detektorze powstają oscylacje, które są tłumione po pewnym czasie od ich wystąpienia (długość cyklu jest rzędu 20...50 μ s). Szybkość narastania oraz współczynnik wypełnienia obwiedni generowanego sygnału zależy od amplitudy aktualnie odbieranego sygnału radiowego. Dzięki temu, po odfiltrowaniu z obwiedni częstotliwości narastania i gąsnięcia drgań, otrzymuje się napięcie proporcjonalne do amplitudy sygnału wejściowego. Z zasady pracy odbiorników superreakcyjnych wynika, że częstotliwość wygaszania musi być co najmniej tysiąc razy mniejsza od częstotliwości sygnału odbieranego, a jednocześnie powinna ona leżeć powyżej częstotliwości dźwięku. Z prostych obliczeń wynika, że odbiorniki superreakcyjne znajdują zastosowanie dopiero w zakresie od 20 MHz wzwyż, a głównie w zakresie UKF. I rzeczywiście, jeszcze w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku były popularne przystawki superreakcyjne do odbiorników niewyposażonych fabrycznie w zakres UKF. W Polsce umożliwiały one odbiór nadawanego od 1954 roku w coraz szerszym wymiarze czasowym programu III. W czasach przed II wojną światową i po niej odbiorniki superreakcyjne były konstruowane także przez krótkofalowców do odbioru pasm amatorskich 50 i 144 MHz. Wadami odbiorników superreakcyjnych były powodowane przez nie zakłócenia (przez znaczną część czasu odbiornik generuje sygnał w.cz. o częstotliwości odbioru wypromieniowywany przez antenę odbiorczą) i dosyć skomplikowana obsługa – przebieg strojenia. Stopień superreakcyjny zapewniał bardzo duże wzmacnienie



Fotografia 1. Detefon (1929 r.) – pierwszy polski radioodbiornik kryształkowy produkowany przez Państwową Wytwórnę Łączności



Fotografia 2. MK2500: Radiomagnetofon MK2500 – jeden z ostatnich wyrobów Zakładów Radiowych Kasprzaka

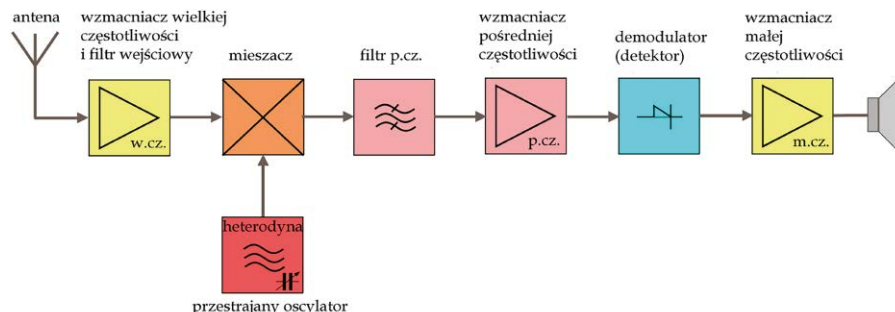
– większe niż w pojedynczych stopniach wszystkich pozostałych rozwiązań, co pozwalało na konstrukcję czułych odbiorników jednolampowych i to było jednym z głównych powodów ich rozpowszechnienia.

Na początku trzeciej dekady XX wieku konstruowano również odbiorniki superreakcyjne na zakresy fal średnich i krótkich. Najbardziej znaną w Polsce była w owym czasie konstrukcja jednolampowego odbiornika (późniejszego) prof. Manczarskiego.

Wszystkie te koncepcje układów odbiorczych były później spotykane przez dłuższy czas w konstrukcjach odbiorników tranzystorowych i to mimo ciągłej obniżki cen tranzystorów. Odbiorniki superreakcyjne bywały używane także i dziś w układach zdalnego sterowania bram garażowych lub zamków samochodowych. Jednym ze współczesnych wydań odbiorników z bezpośrednią przemianą są natomiast odbiorniki z kolejno kluczowanymi (cyklicznie włączanymi i wyłączanymi) stopniami wzmocnienia, co ma zapobiegać wzbudzeniu się wzmacniacza nawet przy dużej czułości układu.

Przełom w konstrukcjach odbiorników radiowych nastąpił z chwilą opracowania odbiornika superheterodynowego, czyli układu z przemianą częstotliwości. Dalsze zwiększanie czułości i selektywności odbiorników o bezpośrednim wzmocnieniu okazywało się coraz trudniejsze. Większa liczba stopni wzmocnienia wielkiej częstotliwości oznaczała jednocześnie zwiększenie liczby obwodów rezonansowych, co oznaczało komplikacje w ich strojeniu współbieżnym, a i tak selektywność takiego układu, zwłaszcza na falach krótkich, pozostawiała wiele do życzenia. Jednocześnie przy większej liczbie stopni szybko wzrastało niebezpieczeństwo wzbudzenia się odbiornika, co uniemożliwiało odbiór nie tylko jego użytkownikom, ale również w bliższym lub dalszym sąsiedztwie.

Drzewo genealogiczne współczesnych odbiorników radiowych zawiera takie zapomniane obecnie rozwiązania jak negadyna i neutrodyna. W odbiornikach negadynowych



Rysunek 3. Schemat blokowy odbiornika superheterodynowego

stosowane były specjalne lampy ładunkowe mające charakterystyki prądu siatki ładunkowej (drugiej, pomocniczej siatki lampy) o pewnym zakresie ujemnych oporności dynamicznych, podobnie jak wynaleziona około 40 lat później dioda tunelowa. Odbiorniki neutrodynowe były wyposażone w układy neutralizacji lamp mające przeciwdziałać wzbudzeniu się stopni wzmacniających.

Układy superheterodynowe (**rysunek 3**) pozwalały na wyeliminowanie większości z wymienionych problemów, ponieważ przeważającą część wzmocnienia zapewniał dostrójony do stałej i stosunkowo niewysokiej częstotliwości wzmacniacz częstotliwości pośredniej (p.c.z.). Filtry wzmacniacza p.c.z. są dostrójone do stałej częstotliwości i zapewniają bez przestrajania stałą, dobrą selektywność. Odbierany sygnał w.c.z. musi ulec przemianie na tę właśnie częstotliwość pośrednią. Do tego celu jest konieczny przestrajany generator lokalny (heterodyna) i stopień mieszający, w którym następuje przemiana częstotliwości.

W miarę rozwoju techniki komputerowej stało się możliwe zastąpienie układowej realizacji wielu stopni odbiorników (i nie tylko) przez ich realizację programową. Potrzeby te spowodowały szybki rozwój techniki specjalnych procesorów sygnałowych (DSP), ponieważ zwykle procesory uniwersalne niezbyt nadają się do tego celu. Miniaturyzacja podzespołów elektronicznych (w szczególności zastosowanie wyspecjalizowanych układów scalonych) pozwoliła na wbudowanie odbiornika w niewielkie urządzenia codziennego użytku, w telefony, zegarki i inne urządzenia przenośne.

Bez względu na architekturę układy odbiorników spełniają niezmiennie wymagania, które dotyczą zakresu częstotliwości, wydajności oraz podstawowych parametrów, jak czułość i selektywność.

Superheterodyna

Odbiór superheterodynowy jest stosowany od prawie 100 lat do dzisiaj

w radioodbiornikach analogowych i w części omówionych dalej odbiornikach z cyfrową obróbką sygnałów. Odebrany przez antenę sygnał wielkiej częstotliwości jest wzmacniany w selektywnym wzmacniaczu niskosumowym (często przestrajanym), gdzie wzmocniony zostaje sygnał tylko w wybranym paśmie częstotliwości. Po wzmocnieniu jest on doprowadzany do mieszacza. Na drugie wejście mieszacza podawany jest sygnał generatora lokalnego (heterodyny), którego częstotliwość jest przestrajana przez użytkownika. Mieszacz przetwarza pożądany sygnał wejściowy na sygnał o częstotliwości pośredniej, który jest różnicą pomiędzy częstotliwością sygnału heterodyny i wybranego. Za mieszaczem jest włączony filtr dostrójony do jednej z tych składowych, na przykład $f_h - f_{w.c.z.}$, nazywanej częstotliwością pośrednią p.c.z. (częstotliwość pośrednia jest stała). Elementem przestrajanym jest natomiast heterodyna, w której częstotliwość jest zmieniana w zależności od odbieranego sygnału.

Wzmacniacz sygnału p.c.z. jest zarazem filtrem pasmowoprzepustowym, przepuszczającym sygnał tylko jednej stacji radiowej. Najczęściej spotykanymi wartościami częstotliwości p.c.z. są 455 lub 465 kHz dla modulacji AM i 10,7 MHz dla modulacji FM. W demodulatorze odzyskuje się oryginalny sygnał m.c.z. z sygnału p.c.z., dokonując jeszcze raz konwersji częstotliwości prowadzącej sygnał do zakresu częstotliwości akustycznych. W zależności od zastosowanej modulacji, demodulator zbudowany jest jako detektor obwiedni albo detektor synchroniczny (AM) lub dyskryminator częstotliwości (FM).

Wadą odbiorników z przemianą częstotliwości jest konieczność zapewnienia tłumienia tzw. sygnału lustrzanego docierającego do anteny. Rozwiązaniem problemu z zakłócaniem odbioru przez sygnały lustrzane jest stosowanie konfiguracji odbiornika superheterodynowego z podwójną lub nawet potrójną przemianą częstotliwości.

25 lat minęło...

Obwody wejściowe

Ważnym elementem każdego toru przetwarzania odbiornika są obwody wejściowe, a w odbiorniku z przemianą częstotliwości także heterodyna i mieszacz. Zadaniem obwodów wejściowych jest wydzielenie z sygnałów docierających do anteny przebiegu o konkretnej częstotliwości, doprowadzenie go do kolejnego stopnia przetwarzania układu z jak najmniejszymi stratami oraz tłumienie wszystkich sygnałów zakłócających docierających do anteny (selektywność). Ważny jest również zakres przestrajania oraz pasmo przenoszenia. Konieczność przestrajania obwodów wejściowych powoduje jednak powstanie pewnych problemów związanych z zapewnieniem ich współbieżności z przestrajaniem heterodyny.

Generatorem lokalnym może być oscylator przestrajany napięciem (VCO). W ostatnich latach rozwinęło się także kilka nowych metod, w tym bezpośrednia synteza cyfrowa (DDS), które są używane do generowania przebiegów o pożądaną częstotliwość. Heterodyna powinna umożliwiać generowanie sygnałów w określonym paśmie i przestrajanie z odpowiednim krokiem częstotliwości.

Dodatkowo powinien ją charakteryzować odpowiednio mały poziom szumów fazowych w danym paśmie pokrywającym się z szerokością kanału. Sygnał wyjściowy generatora powinien również charakteryzować się odpowiednim poziomem potrzebnym do wysterowania mieszacza.

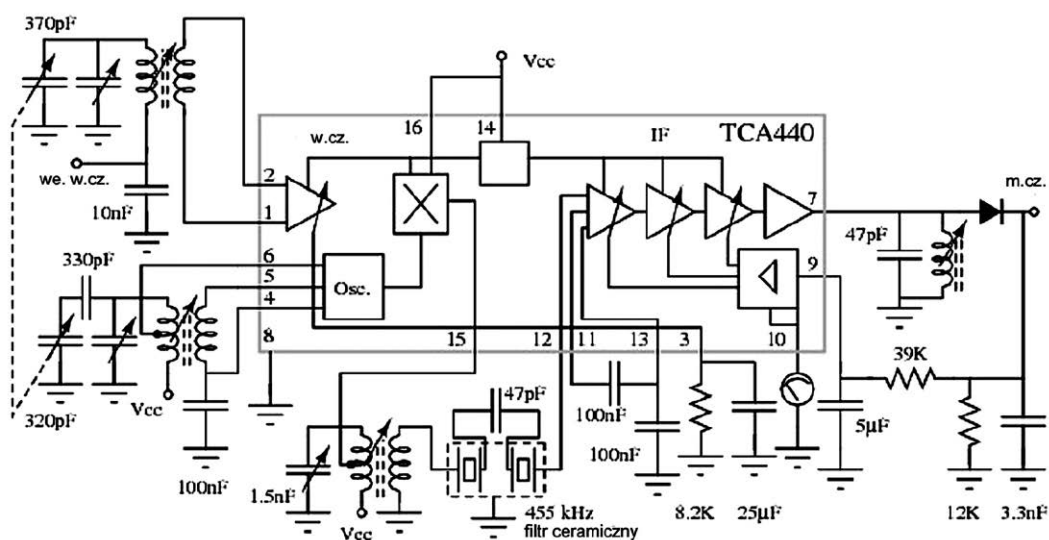
Mieszacze są budowane głównie w oparciu o nieliniowe elementy półprzewodnikowe (diody, tranzystory). Wśród kilku rodzajów mieszaczy są również mieszacze iloczynowe,

w których sygnał wejściowy i sygnał z heterodyny są doprowadzane do dwóch niezależnych wejść – dzięki czemu nie musi być on oparty na elemencie nieliniowym. Przykładem układu tego typu jest mieszacz zrównoważony. Stosuje się go, aby wyeliminować niepożądane składowe o częstotliwości heterodyny, przenikające do wzmacniacza częstotliwości pośredniej znajdującego się za mieszaczem. Popularną strukturą jest mieszacz Gilberta, który zyskał uznanie

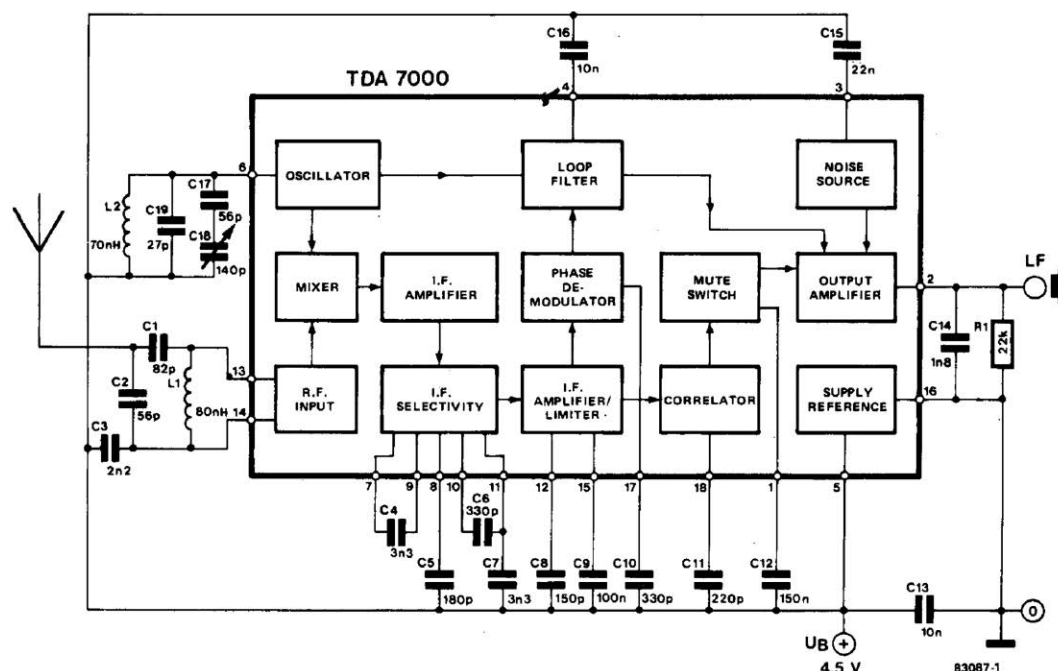
ze względu na korzystne parametry: niski pobór mocy i duże wzmocnienie.

Najważniejsze parametry wzmacniaczy to szerokość pasma, współczynnik szumów, wzmocnienie, napięcie zasilania, pobór mocy i liniowość.

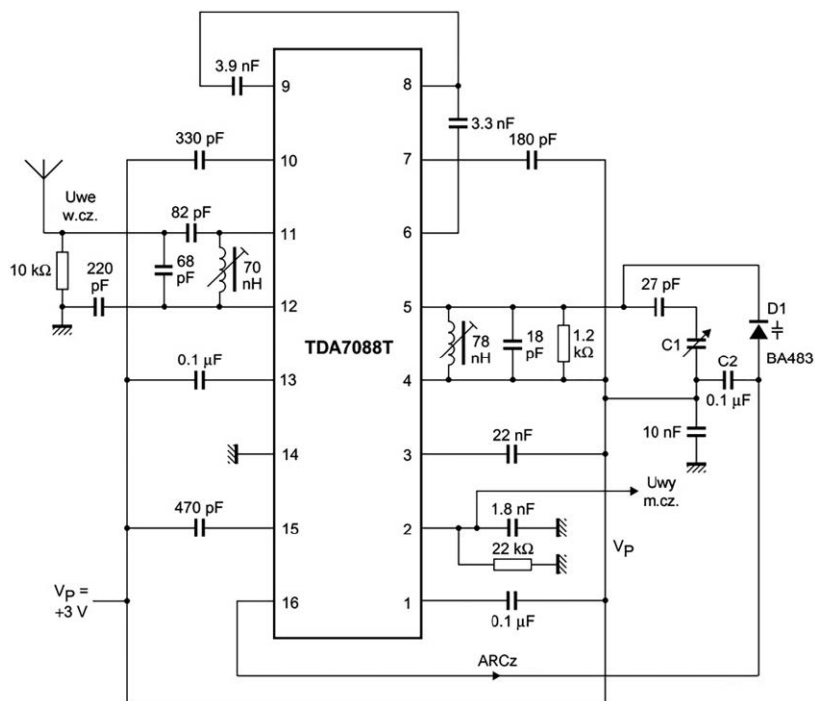
Układy odbiorników superheterodynowych przeszły długą ewolucję, wynikającą z rozwoju produkcji elementów elektronicznych, głównie tranzystorów i układów scalonych oraz filtrów pośredniej częstotliwości.



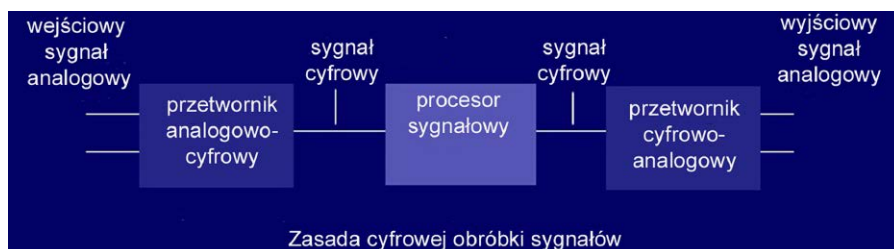
Rysunek 4. Przykładowy schemat ideowy odbiornika z układem TCA440



Rysunek 5. Schemat blokowy układu TDA7000



Rysunek 6. Przykładowy schemat ideowy odbiornika z układem TDA7888



Rysunek 7. Zasada cyfrowej obróbki sygnału

W torach p.cz. filtry LC zostały w przeważającym stopniu zastąpione przez filtry ceramiczne (w odbiornikach powszechnego użytku) lub kwarcowe. Filtry takie nie wymagają strojenia w układzie, co przyczynia się, wśród innych czynników, do obniżki szeroko pojętych kosztów produkcji.

Integracja coraz większej liczby funkcji w pojedynczym układzie scalonym wpływa na właściwości gotowego urządzenia istotne z punktu widzenia użytkowników (niski koszt, mały pobór mocy, mały rozmiar). Jednak bez względu na poziom integracji podstawowe elementy architektury odbiorników i zasadnicze etapy przetwarzania odebranego sygnału pozostają niezmienione.

Układy scalone radioodbiorników analogowych

Klasycznym już rozwiązaniem scalonego odbiornika AM pokrywającego zakresy fal długich, średnich i krótkich jest pokazany na **rysunku 4** układ TCA440 (odpowiedniki

Motoroli – MC1310, RFT – A244, CEMI – UL1203). Wymaga on przyłączenia obwodów wejściowego i heterodyny, ceramicznego filtra p.cz. 455 kHz, detektora diodowego, niewielkiej liczby elementów pasywnych i wzmacniacza m.cz. (przeważnie również w postaci obwodu scalonego) oraz głośnika. Możliwe jest też przyłączenie do niego miernika siły sygnału. Układ TCA440 stał się wzorem dla wielu innych opracowań obwodów scalonych dla radioodbiorników AM, takich jak TDA1046, TDA1072 itd.

Dużym przełomem w rozwoju radioodbiorników był opracowany przed około 40 laty przez firmę Philips układ scalony TDA7000 (**rysunek 5**), który pozwolił na radykalne uproszczenie ich konstrukcji. Ten monolityczny układ scalony TDA7000 jest przeznaczony do przenośnych radioodbiorników FM, w których istotna jest minimalna liczba elementów peryferyjnych (małe wymiary i niski koszt). Zawiera on w swojej strukturze system pętli synchronizacji częstotliwości (FLL) z częstotliwością pośrednią 70 kHz.

Selektywność p.cz. osiągnięta została przez zastosowanie aktywnych filtrów RC. Podczas pracy strojenia wymaga jedynie obwód rezonansowy generatora heterodyny, co pozwala na selekcję sygnału o określonej częstotliwości i wybór stacji radiowej. Zakłóceń odbioru udało się uniknąć przez zastosowanie układu wyciszania, który również eliminuje zbyt szumne sygnały wejściowe. Układ TDA7000 nie jest już wprowadzany do produkcji, ale w sprzedaży znajdują się jego następcy, m.in. pokazany na **rysunku 6** układ TDA7088.

Cyfrowa obróbka sygnałów

Aktualnie większość analogowych elementów toru odbiorczego może być realizowana w technice cyfrowej. Znaczna większość stopni odbiorników radiowych, takich jak stopnie przemiany, filtry, demodulatory czy eliminatory zakłóceń, jest realizowana programowo – za pomocą znanych już od dłuższego czasu algorytmów wykonujących złożone obliczenia matematyczne. Zaletą tych rozwiązań jest powtarzalność parametrów, uniknięcie konieczności strojenia układów – raz opracowany i sprawdzony program wymaga jedynie kopiowania oraz zapewnia uzyskanie powtarzalnych wyników, uniknięcie zależności parametrów od wpływów temperatury, a także od procesów starzenia się elementów. Pojemności kondensatorów czy przenikalności magnetyczne rdzeni cewek ulegają zmianie pod wpływem wahań temperatury panującej wewnątrz układu jak również i w dłuższej skali czasowej pod wpływem ich starzenia się, co powoduje rozstrajanie się filtrów, płynięcie częstotliwości generatorów, niezgodność skal z rzeczywistymi częstotliwościami pracy itp. Nie są to oczywiście wszystkie niekorzystne zjawiska mogące wystąpić w klasycznych analogowych układach elektronicznych, a jedynie ich przykłady. Układy cyfrowe pracują natomiast prawidłowo w szerokim zakresie temperatur i praktycznie aż do uszkodzenia, realizując swoje zadania (programy) stale w taki sam sposób. Konieczność rozróżniania jedynie dwóch poziomów logicznych oznacza, że stosunkowo niewielkie zmiany parametrów elementów, w wyniku ich starzenia się, przez dłuższy czas nie dają żadnych widocznych niekorzystnych zmian w pracy układów cyfrowych.

Zasada pracy układów z cyfrową obróbką sygnałów (DSP) polega na tym, że sygnał wejściowy jest próbkowany z określoną częstotliwością powtarzania (**rysunek 8**), próbki te są następnie przetwarzane na postać

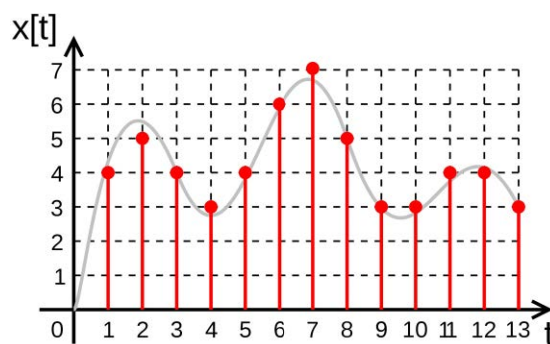
25 lat minęło...

cyfrową w przetwornikach analogowo-cyfrowych (A/C) i cyklicznie przetwarzane za pomocą procesora sygnałowego (procesora o specjalnej konstrukcji wewnętrznej, zoptymalizowanej dla tego typu zadań, charakteryzującego się m.in. rozdzielonymi obszarami pamięci programu i danych, co pozwala na równoległe odczyty danych i programu i układowe jednostki mnożące – gdyż mnożenie jest jedną ze stosunkowo najbardziej czasochłonnnych operacji), a na zakończenie procesu – są ponownie przetwarzane na postać analogową przy użyciu przetworników cyfrowo-analogowych (C/A).

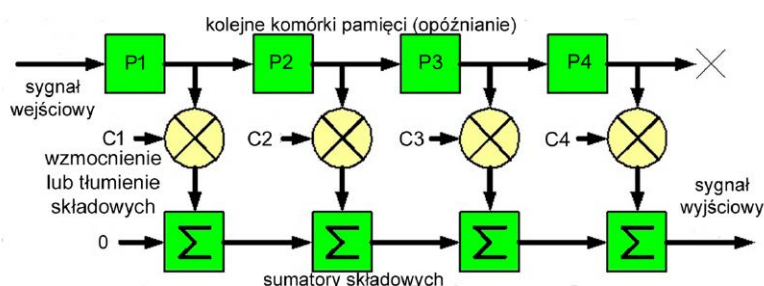
Zgodnie z wymienianą wszędzie w literaturze poświęconej cyfrowej obróbce sygnałów zasadą Nyquista częstotliwość próbkowania musi być wprawdzie co najmniej dwa razy wyższa od najwyższej częstotliwości składowej próbkowanego sygnału, ale zawsze pomiędzy kolejnymi próbkami występują pewne odstępy czasu – sygnał próbkowany nie jest sygnałem ciągłym, a dyskretnym – co jest jednym ze źródeł niedokładności reprezentacji cyfrowej w porównaniu z oryginałem. Drugim najważniejszym źródłem różnic w stosunku do oryginału jest ograniczona rozdzielczość bitowa, co oznacza, że używane w toku dalszych obliczeń wartości liczbowe też mają pewną ograniczoną dokładność (rozdzielczość 8-bitowa pozwala przykładowo na rozróżnienie 256 poziomów napięcia, a 16-bitowa – 65 536 poziomów). Ograniczona rozdzielczość bitowa jest źródłem błędów kwantyzacji. Pomimo tych niedociągnięć, a dzięki dobrze dopracowanym algorytmom uzyskuje się wyniki nieraz znacznie bardziej zbliżone do teoretycznych granic możliwości, aniżeli w układach analogowych.

Do najczęściej potrzebnych operacji należy filtrowanie sygnałów. W rozwiązaniach filtrów o skończonej (w funkcji czasu) odpowiedzi impulsowej (FIR, **rysunek 9**) kolejne próbki sygnału są zapisywane w komórkach pamięci, następnie są one z nich pobierane, mnożone przez odpowiednio dobrane współczynniki (na rys. 9 są to C1, C2,...) i sumowane. W procesie filtrowania bierze więc udział nie tylko aktualnie pobrana próbka, ale i pewna liczba starszych. Współczynniki mnożenia, co odpowiada wzmacnianiu lub tłumieniu składowych sygnału, są dobierane w zależności od wymaganej charakterystyki filtru.

Oprócz filtrów o skończonej czasowo odpowiedzi istnieją również filtry o odpowiedzi teoretycznie nieskończonej (IIR, **rysunek 10**), gdzie przeskalowane wartości próbek są dodawane zarówno do wartości próbek starszych, jak i do nowszych, co oznacza występowanie sprzężeń zwrotnych i jak zwykle w takich przypadkach grozi niebezpieczeństwem wzbudzenia się filtru.



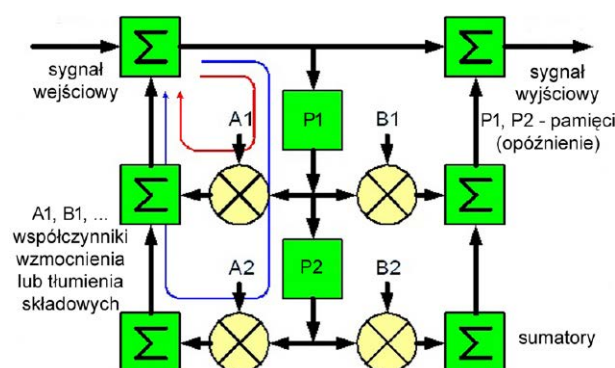
Rysunek 8. Przebieg próbkowania sygnałów



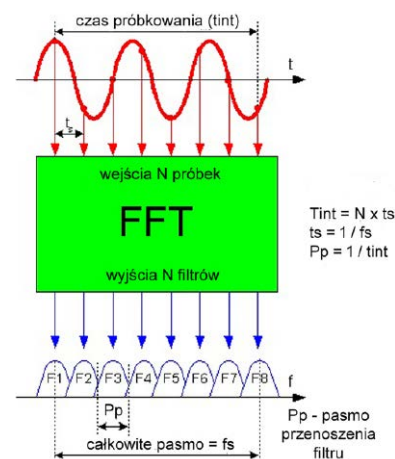
Rysunek 9. Filtr FIR (o skończonej odpowiedzi impulsowej)

Do analizowania i filtrowania sygnałów stosowana jest również szybka transformata Fouriera. Jej zoptymalizowany dla potrzeb procesorów sygnałowych algorytm nosi oznaczenie DFT. Jak to przedstawiono na **rysunku 10** z pewnej (znaczenie większej niż w tym przykładzie) liczby próbek uzyskuje się wynik w postaci składowych częstotliwościowych, tak jakby sygnał został przefiltrowany przez dużą liczbę połączonych równoległe wąskopasmowych filtrów. Obliczenia związane z tą operacją są dość skomplikowane i stanowią prawdziwe wyzwanie dla procesorów sygnałowych. W odróżnieniu od układu równoległych obwodów rezonansowych wyniki operacji otrzymuje się z opóźnieniem, a nie natychmiast.

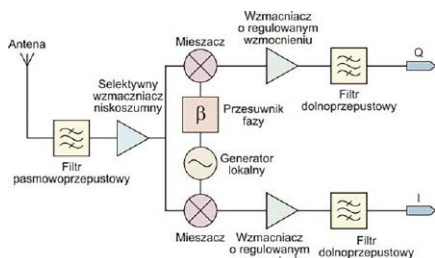
W porównaniu z omówionymi przykładami niektóre operacje są dla procesorów sygnałowych proste. Wzmocnienie polega na przemnożeniu liczbowych wartości próbek przez potrzebny współczynnik wzmocnienia, odwrócenie fazy – na przemnożeniu ich przez -1 lub ujemny współczynnik wzmocnienia, tłumienie – na przemnożeniu



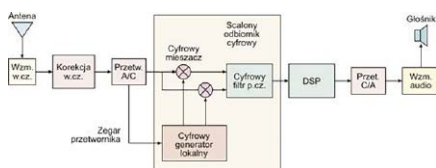
Rysunek 10. Filtr IIR (o nieskończonej odpowiedzi impulsowej)



Rysunek 11. Analiza sygnałów przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera



Rysunek 12. Schemat blokowy wyjaśniający zasadę działania odbiornika SDR



Rysunek 13. Schemat blokowy scalonego odbiornika cyfrowego



Fotografia 14. Odbiornik globalny Tecsun PL310 z układem Si4734 umożliwia odbiór częstotliwości: FM: 64–108 MHz (stereo); MW: 522–1620 kHz (wybór kroku 9 kHz lub 10 kHz); LW: 153–513 kHz; SW: 2300–21 950 kHz

przez ułamek, a diodowa detekcja amplitudy – na odrzuceniu znaku ujemnego dla dolnych połówek fali, czyli na uwzględnieniu tylko wartości bezwzględnej próbek. Oczywiście realizowane są też bardziej skomplikowane rozwiązania detektorów, takie jak dyskryminatory częstotliwości, detektory SSB, detektory i dekodery emisji cyfrowych (PSK31, RTTY, SSTV itd.), deszyfratory, dekodery DAB+, DRM (Digital Radio Mondiale) i innych systemów cyfrowego dźwięku itp. Technika cyfrowej obróbki sygnałów pozwala też na uzupełnienie układów odbiorczych o programowe rozwiązania zawierające (inteligentne) filtry, w tym także automatyczne filtry zaporowe, eliminatory szumów lub zakłóceń, kompresory mowy, korektory barwy dźwięku itd. Korektory te oprócz szerokich możliwości indywidualnego kształtowania charakterystyki zawierają wbudowane programowo profile dla poszczególnych rodzajów muzyki.

Więcej informacji na temat cyfrowej obróbki sygnałów, w tym cały aparat matematyczny, można znaleźć w dostępnej literaturze.

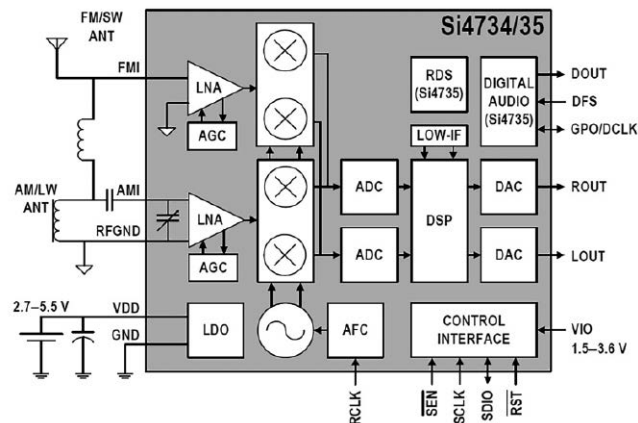
Odbiorniki programowalne

Odbiorniki pracujące na zasadzie cyfrowej obróbki sygnałów, nazywane także odbiornikami programowalnymi (SDR, rysunek 12), można podzielić na kilka głównych grup.

Do pierwszej z nich zaliczamy odbiorniki współpracujące z komputerami (PC, androïdowymi itd.), a do drugiej odbiorniki pracujące autonomicznie i wyposażone we własny procesor sygnałowy. Zarówno w jednej, jak i drugiej grupie występują z kolei rozwiązania o mniej lub bardziej rozbudowanej części analogowej toru odbiorczego.

Nieskomplikowane rozwiązania o bezpośredniej przemianie częstotliwości, czyli homodynowe (ang. *direct conversion* lub *zero-IF*), zawierają mieszacz kwadraturowy dostarczający do komputera lub procesora sygnałowego dwóch przesuniętych o 90 stopni względem siebie – czyli ortogonalnych – sygnałów: synfazowego I i kwadraturowego Q. Mieszacz ten może być w najprostszym przypadku poprzedzony obwodem wejściowym i wzmacniaczem w.c.z., a w rozwiązaniach bardziej rozbudowanych – przez klasyczny tor odbiorczy z pojedynczą lub podwójną przemianą częstotliwości (rysunek 13). Zamiast częstotliwości zerowej jako trzecia (najczęściej) częstotliwość pośrednia stosowana jest też częstotliwość 12 kHz lub do niej zbliżona. O parametrach wymienionych odbiorników decydują w dużym stopniu właściwości przetworników analogowo-cyfrowych, w tym liniowość charakterystyki przetwarzania, równomierność rozmieszczenia stopni (nieliniowość różniczkowa), odporność na przesterowania (szeroki zakres dynamiki) i szybkość konwersji. W układach heterodyn stosowana jest obecnie prawie wyłącznie bezpośrednia cyfrowa synteza częstotliwości (DDS).

Osobną grupę stanowią odbiorniki o bezpośredniej przemianie analogowo-cyfrowej. W układach tych sygnał odebrany po odfiltrowaniu w obwodach wejściowych jest podawany od razu na przetwornik analogowo-cyfrowy, od którego wymaga się



Rysunek 15. Schemat blokowy mikroprocesora DSP SiLabs Si4734

szerokiego zakresu dynamiki i dużej szybkości konwersji. Cała dalsza obróbka odbywa się już cyfrowo. Odbiorniki takie pokrywają stosunkowo szerokie zakresy częstotliwości (co najmniej fale długie, średnie i krótkie razem wzięte), dlatego też pierwszym i niezbędnym krokiem jest selekcja próbek (*decimation*). Dopiero wyselekcjonowane próbki odpowiadające pożądanemu akuratom podzakresowi są poddawane dalszej obróbce.

Odbiorniki cyfrowe zrewolucjonizowały systemy elektroniczne w takich dziedzinach jak komunikacja, akwizycja danych czy przetwarzanie sygnału. W radiokomunikacji od wielu lat obserwuje się trend, polegający na konstruowaniu odbiorników wielostandardowych, czyli takich, które potrafią obsługiwać wiele różnych standardów (GSM, GSM+GPS, UMTS+WLAN...).

Procesory DSP w radioodbiornikach

W ostatnim czasie dostępne są wyspecjalizowane układy scalone z wykorzystaniem najnowszej techniki DSP z przeznaczeniem do radioodbiorników globalnych.

Produkowany przez Silicon Labs w USA układ scalony serii si4734 jest wykorzystywany powszechnie w japońskich odbiornikach globalnych Tecsun (fotografia 14).

Radiowy odbiornik Si4734/35 (rysunek 15) wykonany w technologii CMOS pokrywa zakresy fal średnich do 1710 kHz, najważniejsze krótkofalowe pasma radiofoniczne 13, 16, 19, 22, 25, 31, 41 i 49 m i zakres UKF 64 – 108 MHz.

W zakresie tym można wybrać podzakresy UKF wraz ze standardowymi wartościami deemfazy dla wielu krajów i regionów świata – Europy OIRT, CCIR, Chin, Japonii, USA itd. Układ cyfrowy zapewnia niespotykane dotąd w tej klasie urządzeń doskonałe parametry odbiorcze, czułość, selektywność,

25 lat minęło...

może też w pewnym stopniu poprawiać stosunek sygnału do szumu i eliminować część zakłóceń.

Układ scalony Si4834/35 (rysunki 16...18) integruje zaawansowane algorytmy wyszukiwania, miękkie wyciszenie, autokalibrowane cyfrowe strojenie i stereofoniczne przetwarzanie FM. Ponadto zapewnia analogowe lub cyfrowe wyjście audio i programowalny zegar referencyjny. Urządzenie obsługuje I2C, 2-przewodową magistralę sterującą. W strukturze układu jest też cyfrowy procesor dla systemu danych radiowych (RDS), syntezy częstotliwości ze zintegrowanym VCO, automatyczna regulacja częstotliwości (ARC; AFC), automatyczna kontrola wzmocnienia (ARW; AGC), zintegrowany regulator LDO, cyfrowy dekodery stereofoniczny FM, strojenie cyfrowe we wszystkich zakresach.

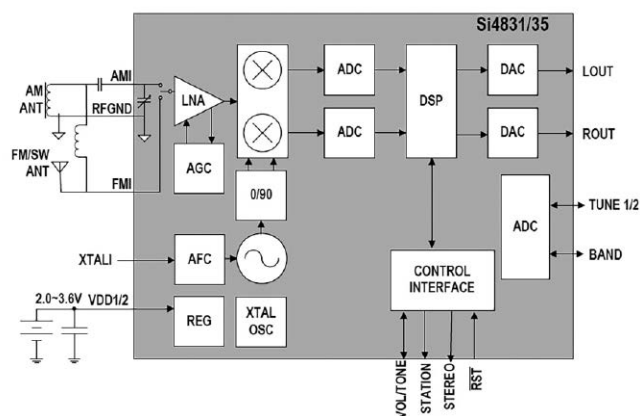
Układ scalony zajmuje mało miejsca i wymaga minimalnej liczby zewnętrznych podzespołów.

W ostatnich latach pojawił się tuner radiowy z układem RDA5807 w postaci modułu o wymiarach 11 mm×11 mm×2 mm (fotografia 19). Zawiera on układ scalony radiodiodni, rezonator kwarcowy oraz kilka elementów biernych. Moduł jest tani i bardzo łatwy w montażu.

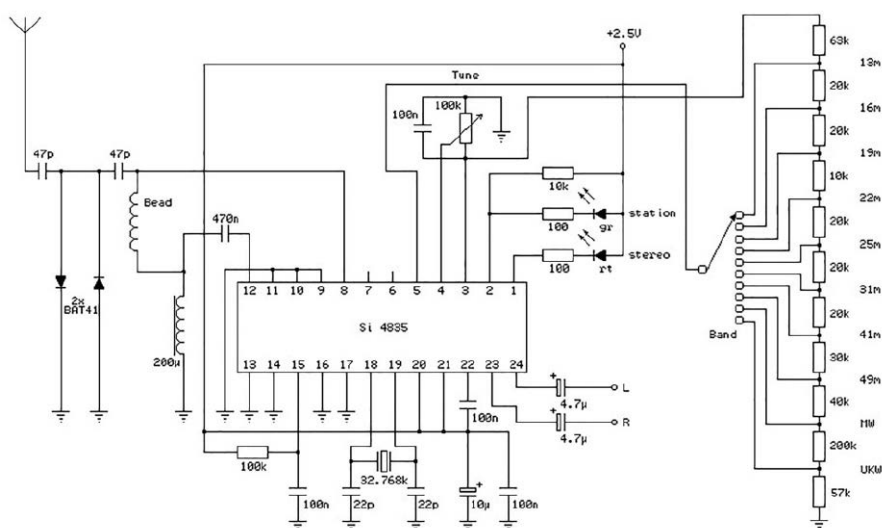
Oprócz doprowadzenia zasilania, wymaga jeszcze tylko sygnału zegarowego i doprowadzenia anteny. Na wyjściu jest dostępny stereofoniczny sygnał audio, a odczyt informacji RDS, statusu i oraz konfigurowanie układu odbywa się za pomocą złącza szeregowego I²C. Schemat ideowy jego aplikacji pokazano na rysunku 20.

Odebrane z modułu dane RDS są podzielone na 4 rejestry RDSA...RDSB (umieszczone w rejestrach o adresach od 0x0C do 0x0F). W rejestrze RDSB znajduje się informacja o grupie danych. Istotne grupy to 0x0A zawierająca podstawowy tekst RDS (8 znaków) oraz 0x2A zawierająca tekst rozszerzony (64 znaki).

Postępująca cyfryzacja radiofonii oznacza konieczność wyposażenia odbiorników w dekodery sygnałów cyfrowego dźwięku. Dzięki zastosowanej technice kompresji cyfrowa transmisja dźwięku pozwala na lepsze wykorzystanie ograniczonego widma częstotliwości. Zamiast transmisji programów radiowych pojedynczo stosowana jest transmisja grupowa w postaci zajmujących w przybliżeniu pasmo 1,5 MHz multipleksów



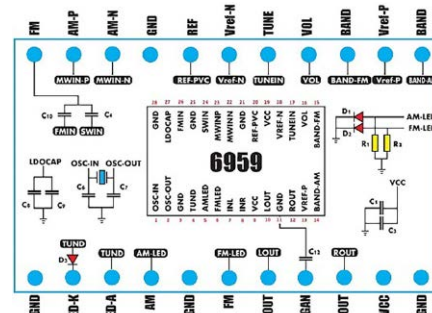
Rysunek 16. Schemat blokowy mikroprocesora DSP Si4835



Rysunek 17. Przykładowy schemat ideowy odbiornika z układem Si4835

zawierających nawet do kilkunastu programów radiowych – w zależności od jakości transmisji. Odbiorniki cyfrowego dźwięku są wyposażone w funkcje automatycznego przeszukiwania zakresów, wyświetlacze informujące o najważniejszych danych, takich jak nazwa stacji lub programu, tytuł audycji albo nadawane utwory, nazwiska wykonawców, jakość odbioru (stopień błędów) oraz częstotliwość nadawania. Cyfryzacja radiofonii przebiegała wprawdzie nie bez zawirowań (poprzedni system DAB był w wielu krajach porzucany prawie bez ostrzeżenia, co skazywało zakupione wyposażenie na wyrzucenie na śmietnik), ale nadajniki obecnie stosowanego systemu DAB+ są odbierane już na większej części terytorium Polski i podobnie jest też w innych krajach UE. Norwegia jest nawet w trakcie

kompletnego wyłączenia analogowej radiofonii UKF. Programy radiowe w systemie DAB+ są nadawane w rozszerzonym paśmie III (174–240 MHz), w którym poprzednio



Rysunek 18. Struktura scalonego tunera stereo FM/TV/MW/SW/LW PVR typu AKC6959

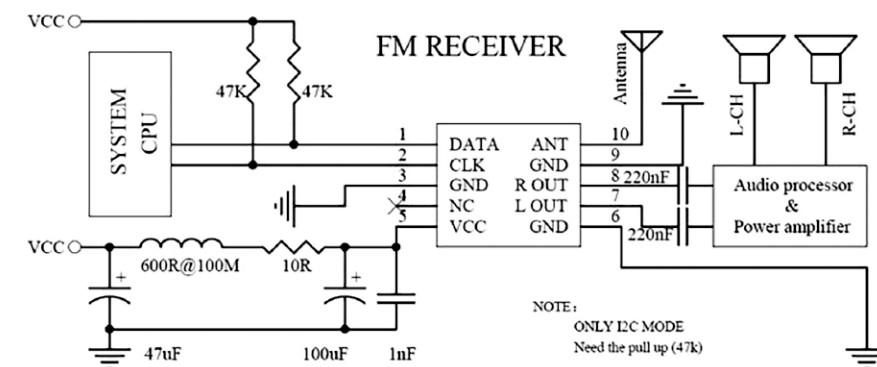


Fotografia 19. Moduł RDA5807

nadawana była telewizja analogowa (kanały 5–12 CCIR lub 6–12 OIRT).

Radiofonia internetowa

Omawiając przemiany zachodzące w dziedzinie odbioru radiowego, nie sposób nie wspomnieć o odbiornikach internetowych. Formalnie rzecz biorąc, nie są to odbiorniki o konstrukcjach podobnych do przedstawionych powyżej, a są to raczej mikrokomputery obsługujące – przeważnie bezprzewodowo przez łącze Wi-Fi – internetowe połączenia z serwerami udostępniającymi programy radiowe w postaci strumieni danych (ang. *streaming*). Mniej lub bardziej wygodna powierzchnia obsługi, w której skład wchodzi wyświetlacz, przyciski i ewentualnie odczytywane elektronicznie pokrętki, pozwala na wybór pożądanego programu radiowych i dokonywanie typowych regulacji. O jakości odbioru decydują nie czułość i selektywność odbiornika, a szybkość transmisji w łączu internetowym i obciążenie serwerów radiowych. O ile w sytuacjach



Rysunek 20. Schemat aplikacji RDA5807

zwyczajnych odbiór radiowy przez Internet przebiega właściwie bez większych problemów, o tyle w przypadku ważnych wydarzeń, którymi jest zainteresowana znacznie większa liczba osób niż na co dzień, może szybko dojść do przeciążenia serwerów, co całkowicie uniemożliwi odbiór znacznej reszty słuchaczy. Zaletami odbioru internetowego są natomiast czysty, dobrze zrozumiały nasłuch dalekich i bliskich stacji, a także uniezależnienie się od lokalnych zakłóceń. Transmisję internetową daje się jednak kontrolować w znacznie większym stopniu i na dodatek łatwiej niż odbiór radiowy, zwłaszcza w zakresach zapewniających dalsze zasięgi, co przekłada się na ograniczenie lub uniemożliwienie odbioru transmisji z wydarzeń sportowych poza granicami wyznaczonych przez reklamodawców krajów, albo ograniczenie dopływu informacji politycznych w krajach dbających o „prawomyślność” swych obywateli.



Fotografia 21. Radio SuperConnect wyposażono w odbiornik DAB, DAB+, FM z RDS oraz radio internetowe, zapewniające dostęp do ponad 16 tysięcy stacji radiowych z całego świata

Wzrastający stale i systematycznie poziom zakłóceń technicznych coraz bardziej utrudnia korzystanie z zakresów fal średnich i znacznej części fal krótkich, w mniejszym stopniu także i fal długich, co będzie powodować dalszy wzrost atrakcyjności odbioru internetowego wśród osób, które ze względów zawodowych, zainteresowanie nauką języków obcych (zwłaszcza innych niż wszechobecny angielski) lub dłuższego pobytu poza krajem ojczystym są zdane na odbiór oddalonych stacji radiowych.

Wiele modeli odbiorników internetowych daje też możliwość odbioru radiofonii analogowej FM i cyfrowej DAB+, więc włączenie ich tutaj nie jest tak całkiem nie na miejscu (fotografia 21).

Nie sposób na kilku stronach pokazać wszystkich aspektów związanych z rozwojem cyfrowego radia. W artykule poruszone zostały jedynie najważniejsze aspekty w postaci możliwie skondensowanej, ale jednocześnie łatwo zrozumiałej.

Autor dziękuje Krzysztofowi Dąbrowskiemu za cenne uzupełnienia.

Andrzej Janeczek
sp5aht@swiatradio.com.pl

MEDIA ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

Od stycznia br. zmieniliśmy sposób dostarczania Czytelnikom EP materiałów dodatkowych dołączonych do numeru.

1. Wejdź na stronę www.media.avt.pl
2. Zarejestruj się/zaloguj
3. Wybierz wydanie „Elektroniki Praktycznej”, które chcesz dodać do swojej biblioteki.
4. Odpowiedz na proste pytanie dotyczące bieżącego numeru.
5. Pobieraj pliki.

