

**Bogdan OLECH**

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, WYDZIAŁ INFORMATYKI  
WYDZIAŁ INFORMATYKI  
ul. Żołnierska 49, 71-210 Szczecin

## Integracja radaru wizualizacji podpowierzchniowej (GPR) z użyciem technologii FPGA

Dr inż. Bogdan OLECH

Uzyskał tytuł magistra oraz inżyniera na Politechnice Szczecińskiej w roku 1986, stopień doktora uzyskał w roku 1999 na Politechnice Warszawskiej. Obecnie pracuje na Wydziale Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Współpracuje z firmami innowacyjnymi regionu. Jego zainteresowania naukowe, to: wizualizacja podpowierzchniowa i radarowa.



e-mail: bolech@wi.zut.edu.pl

### Streszczenie

Radar wizualizacji podpowierzchniowej służy do zobrazowania struktur niedostępnych dla wzroku ludzkiego (geologia, budownictwo, archeologia, wykrywanie min bojowych itp.). Integracja radaru narzuca szczególne cechy techniczne komponentów składowych (np. różnorodność i precyzja czasowa sygnałów). Technologia FPGA doskonale spełnia te wymagania, oferując możliwość generowania wysokorozdzielczych czasowo sygnałów, budowania transmisji danych oraz wykonywania zadań cyfrowego przetwarzania sygnałów.

**Słowa kluczowe:** reprogramowalne tablice logiczne, radar, georadar.

### Ground penetrating radar (GPR) integration with FPGA technology

#### Abstract

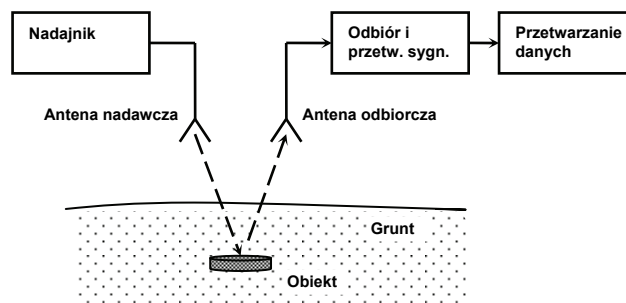
Ground penetrating radar (GPR) takes many different forms according to the specific application area (geology, architecture, archeology, mine detection, etc.). But the general idea is always the same; some RF/microwave spectrum is transmitted and its reflections from objects are received and converted to a computer image. It looks quite similar to the airborne radar concept, except: observed objects are rather small, being nearby to the antenna system and located underground. To observe small objects, a wide bandwidth is needed, of a few GHz usually. When objects are near the antenna system it is hardly possible to use gating in order to eliminate multi reflections. The near field geometry directly influences image reconstruction algorithms. The surface of the ground (or other material) separates in fact two dielectrics with quite different electrical properties, internal inhomogeneity is typical for a soil; strong surface reflections and clutter appear. GPR is one of the most difficult radar to build. Its antenna system is extremely difficult to construct. The bandwidth has to be the ultra-wideband (UWB) kind. The electronics has to synthesize and acquire high frequency radio signals. In this work an experimental GPR is presented, with attention paid to the use of FPGA technology as a bloodstream of the system. The FPGA is able to generate high resolution in time control signals, form transmission data paths and allows implementation of high speed digital signal processing tasks.

**Keywords:** FPGA, Radar, GPR.

## 1. Wstęp

Radar obserwacji podpowierzchniowej (*Ground Penetrating Radar* - GPR, *Subsurface Radar*, określane też po polsku jako georadar) przyjmuje różne formy realizacji, w zależności od dziedziny stosowania (geologia, budownictwo, archeologia, ratownictwo, wykrywanie min i ładunków improwizowanych itp.). Jednak, ogólna zasada pracy jest zawsze taka sama (rys. 1): określone spektrum fal radiowych/mikrofal jest emitowane (nadajnik) w przestrzeń za pośrednictwem anteny nadawczej. Fale napotyka- jąc obiekty odbijają się od nich i częściowo wracają do anteny odbiorczej. Energia fal powrotnych zostaje wzmocniona i poddana

detekcji (odbiór i przetwarzanie sygnałów), następnie, poddana jest rekonstrukcji w czasie i przestrzeni, aby można było wygenerować obraz komputerowy obiektów (przetwarzanie danych). Na takiej samej zasadzie działają typowe radary napowietrzne, jednak istnieją istotne różnice: w radarze wizualizacji podpowierzchniowej obserwowane obiekty są relatywnie małe (począwszy od pojedynczych centymetrów średnicy), położone bardzo blisko względem systemu anten (nawet 20 cm) oraz umieszczone są pod powierzchnią gruntu. Małe obiekty, aby były rozróżnialne, wymagają użycia znacznego pasma częstotliwościowego fali, rzędu kilku lub kilkunastu GHz (1 GHz, to rozdzielność rzędu 30 cm, w powietrzu). Bliskie położenie obiektów względem anten drastycznie utrudnia stosowanie bramkowania sygnału (dla radarów z falą ciągłą) eliminujące wielokrotne odbicia. Utrudnia też wyznaczenie struktury geometrycznej modelowania rozpraszania/odbicia w procesie rekonstrukcji obrazu. Gleba posiada inny współczynnik przenikalności dielektrycznej względnej ( $\epsilon_r$ ) niż powietrze (typowo, ok 4 razy większy, sucha), to generuje silne odbicia fali od powierzchni gruntu. Silne odbicia od powierzchni powodują z kolei wtórne (fizyczne lub za sprawą transformaty Fouriera) nakładanie się rozjaśnień na obraz widoczny z głębi ziemi. Poza tym, sygnał odbierany z głębszych warstw ziemi jest słaby za sprawą tłumienia fali elektromagnetycznej (tym silniejszego im większa jest częstotliwość,  $\epsilon_r$  i w miarę wzrostu głębokości) oraz dodatkowo zniekształcani niejednorodnością gleby ( $\epsilon_r$ ). Ponadto, bardzo ważne jest, by obraz lub automatyczna klasyfikacja obiektów, realizowane były w czasie rzeczywistym. Jest to szczególnie pożądane dla systemów wykrywających ładunki wybuchowe. Wiąże się to ze szczególnie dużym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową. Przy tym, systemy przenośne powinny zużywać niewiele energii i być lekkie.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy radaru obserwacji podpowierzchniowej  
Fig. 1. Simplified block diagram of a ground penetrating radar

Wszystko to razem sprawia, że radar wizualizacji podpowierzchniowej jest jednym z najbardziej trudnych urządzeń do skonstruowania. System anten takiego radaru musi zapewniać szerokopasmowość, odporność na zmiany własności blisko położonego gruntu oraz odporność na wewnętrzne (wewnątrz anteny) odbicia fali. Są to warunki niezwykle trudne do spełnienia jednocześnie. Szerokopasmowość sygnału radarowego odzwierciedla się również, poza antenami, w sposobie realizowania toru syntezy częstotliwości, odbioru, wzmacniania i przetwarzania sygnałów [1, 2].

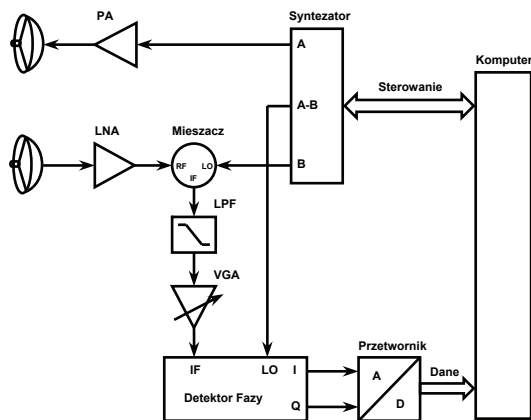
Technologia FPGA (*Field Programmable Gate Array*) stała się już standardowym podejściem w realizacji systemów radarowych. Zapewnia możliwość generowania wysokorozdzielczych czasowo sygnałów sterujących, budowania torów transmisji danych oraz wydajnej realizacji zadań cyfrowego przetwarzania sygnałów. Pozwala ona (w wersji reprogramowalnej) na ciągłe modyfikowa-

nie realizowanych implementacji. Wysoka wydajność przetwarzania sygnałów uzyskiwana jest głównie poprzez niskopoziomowe zrównoleglenie działań. Technologia FPGA oferuje wręcz programistyczne podejście do realizowania aplikacji. W rezultacie, w znacznej mierze wyparła z rynku rozwiązania ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) oraz standardowe (mikroprocesory DSP).

W pracy przedstawiona została wersja eksperymentalna, autorska, radaru wizualizacji podpowierzchniowej. Opis realizacji systemu radarowego zawarty został w punkcie 2. W punkcie 3 opisane jest zdalnie sterowane rozwiązanie mobilne radaru. Punkt 4 przedstawia przykładowe wyniki pomiarowe. Punkt 5 zawiera podsumowanie i wnioski.

## 2. Realizacja systemu radarowego

Na rys. 2 zaprezentowany jest schemat blokowy realizowanego radaru GPR (ze skokową modulacją częstotliwości) ze zintegrowanym syntezatorem częstotliwości. Sygnał kanału A, po wzmocnieniu (PA), trafia do anteny nadawczej. Sygnał anteny odbiorczej, z kolei, po wstępnym wzmocnieniu (LNA) dociera na wejście szerokopasmowego mieszacza. Do mieszacza dostarczany jest także sygnał LO, pozyskiwany z kanału B syntezatora. Wyjście IF mieszacza wyprowadza sygnał odbierany, ułożony na częstotliwości pośredniej. Sygnał ten, po filtracji (LPF) i wzmocnieniu (regulowanym – VGA) trafia na wejście detektora fazy. Wejście LO detektora fazy przyłączone jest do wyjścia A-B syntezatora, zapewniające sygnał wzorcowy porównywania fazy.

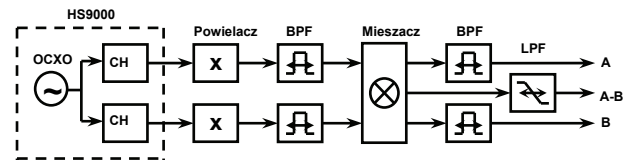


Rys. 2. Realizowany radar skokowej modulacji częstotliwości  
Fig. 2. The stepped frequency continuous radar being under development

Do realizacji podstawowego komponentu syntezatora częstotliwości wybrano moduł typu HS9000 firmy Holzworth. Jest to moduł mogący zintegrować do 8 niezależnych syntezatorów o wartości częstotliwości do 6,720 GHz. Do projektu wybrana została wersja modułu generująca dwa niezależne sygnały; pierwszy w przedziale 250 kHz do 6,720 MHz, drugi zaś w przedziale 250 kHz do 2,048 GHz. Z uwagi na to, że moduły umieszczone są w jednej obudowie, są one doskonale sprzężone termicznie. Wspólny oscylator referencyjny i sprzężenie termiczne umożliwiają uzyskanie doskonałej zgodności fazowej sygnału wyjściowego poszczególnych modułów. Syntezator oferuje bardzo dobrą prędkość przełączania częstotliwości. Gdy jest wybierana bezpośrednio z wewnętrznej listy (załadowanej wcześniej do pamięci procesora modułu), to następuje w czasie krótszym niż 6  $\mu$ s (dla wartości nie większych niż 5% pasma). Należy podkreślić, że moduły realizują syntezę z wykorzystaniem analogowego powielania i przełączania, bez użycia pętli PLL. Zapewnia to eliminację efektu dociągania fazy. W związku z tym, zachowana jest zgodność fazowa na granicy przełączeń. Absolutna stałość fazy względem procesu przełączania ma ogromne znaczenia w realizacji

GPR o skokowej modulacji częstotliwości. Eliminowany jest w ten sposób błąd fazy na granicy przełączeń.

Istniała konieczność poszerzenia możliwości modułu HS9000 z uwagi na wymagany zakres przestrajania częstotliwości syntezatora. Na rys. 3 przedstawiony jest schemat blokowy rozbudowy modułu HS9000. Sygnały obydwu kanałów (CH #1, CH #2), niezależnie, mogą być podane na wejście powielaczy i podlegać zwielokrotnieniu z uwagi na wartość częstotliwości. Oferowana rozdzielczość przestrajania częstotliwości kanałów (1 mHz), nie ogranicza powielania, wymagana rozdzielczość przestrajania jest zapewniona.

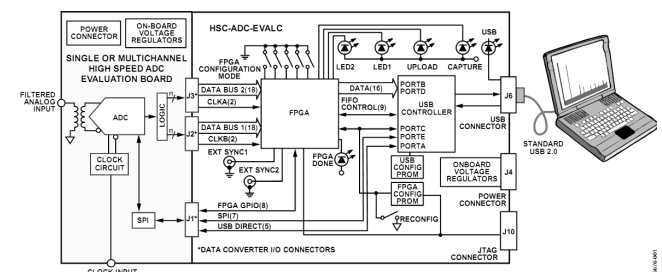


Rys. 3. Schemat blokowy syntezatora  
Fig. 3. Block diagram of frequency synthesis

Powielanie jest procesem degradującym próg szumowy, w związku z tym należy maksymalnie ograniczać krotność powielania. Kanał #1 pozwala uzyskać wartość 6,720 GHz. Dwukrotne powielenie daje 13,440 GHz. Można też zastosować powielenie x4 dla kanału #1, wówczas uzyskać można 26,880 GHz. Jednak w tym przypadku próg szumowy sygnału o częstotliwości wynikowej kanału #1 podniesie o ponad 12 dB [3].

Istotnym problemem jest konieczność usuwania częstotliwości harmonicznych powstających podczas powielania i mnożenia. Zważywszy na to, że częstotliwości poszczególnych kanałów zmieniają się w procesie modulacji skokowej, filtry te muszą być na bieżąco przestrajane. Na rys. 3 zaznaczone są też bloki filtrów pasmowych (BPF) i dolnoprzepustowego (LPF). Zaplanowany jest kombinowany sposób przestrajania tych filtrów; poprzez przełączanie podzakresów oraz poprzez przestrajanie analogowe.

Analogowy detektor fazy wykonany jest z użyciem płytki ewaluacyjnej ADC5380 30A-EVALZ. Sygnały po detekcji przekazywane są do 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego (płytki ewaluacyjna: AD9262 10EBZ). Sygnał każdego z kanałów, w formie cyfrowej, dostarczany jest do modułu konwersji (HSC ADC EVALC). Moduł ten realizuje szybką transmisję z przetwornikiem, dokonuje konwersji standardów, następnie przekazuje dane w standardzie USB do komputera radaru (komputer przemysłowy typu ARK-3440F-U4A1E).



Rys. 4. Zastosowanie w torze detekcji sygnału płytki typu HSC-ADC-EVALC (Analog Devices)  
Fig. 4. The HSC-ADC-EVALC evaluation board in a signal detection path (Analog Devices)

Na rys. 4 przedstawiony jest schemat płytki ewaluacyjnej typu HSC-ADC-EVALC. Jak widać ze schematu, centralnym elementem płytki jest moduł FPGA. W module tym realizowana jest komunikacja z przetwornikiem (AD9262 10EBZ w tym przypadku). Moduł FPGA pośredniczy również podczas ustawiania parametrów rejestrowych przetwornika, za pośrednictwem magistrali SPI. Płytkę wyposażoną jest również w testowe oprogramowanie

(Visual Analog) pozwalające na szybki podgląd i analizę odbieranego sygnału.

Przetwornik analogowo-cyfrowy umieszczony na płycie AD92-10EBZ zawiera 2 kanały 16-bitowego przetwarzania o architekturze sigma-delta, 32-krotne nad-próbkowanie zapewnia duży zakres dynamiki. Przetwornik posiada również programowalne filtry cyfrowe w paśmie do 10 MHz. Znamienne dla przetwornika jest to, że jest on dedykowany do obsługi detektorów I/Q. Posiada mechanizmy estymacji i programowej korekcji błędów w powstających typowo w obrębie detektorów analogowych I/Q.

### 3. Rozwiązanie mobilne

Realizacja mobilna radaru pozwala na skanowanie terenu w warunkach naturalnych. Pozwala również w łatwy sposób na realizowanie badań w warunkach laboratoryjnych. Na rys. 5 przedstawione jest stanowisko badań zapewniające zbliżone warunki do naturalnych. Wykonane zostało w postaci styropianowej rampy z utwardzoną drogą jezdnią. W ten sposób powstała przestrzeń, która na długości (i szerokości) 1 m została wypełniona ziemią.



Rys. 5. Realizowany radar w wersji mobilnej  
Fig. 5. Mobile version of the GPR experimental prototype

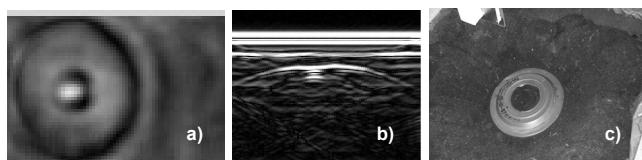
Przesuw anten wzdłuż toru realizowany jest za pośrednictwem napędu kołowego. Drugi kierunek ruchu anten zapewniony jest poprzez liniowy napęd umieszczony z przodu pojazdu. Zatem, anteny mogą skanować pas terenu o szerokości 1 m. Dla potrzeb swobodnego ruchu w terenie przewidziane są aktywne koła skrętne (z tyłu pojazdu), zaś przednie będą napędzane niezależnie. Wszystkie silniki są typu krokowego. Sterowanie impulsowe silników odbywa się za pośrednictwem płyty prototypowania FPGA typu Spartan3 1000K. Zarówno ta płyta, jak i inne elementy wyposażenia sterowane są za pośrednictwem lokalnego komputera przemysłowego (komputera radaru). Komputer ten realizuje również zdalną komunikację WiFi z wysokowydajnym komputerem typu PC. Całość umieszczona jest na sztywnej ramie aluminiowej zaś elementy systemu zabudowane są w skrzyni transportowej. Na ramie aluminiowej umieszczona jest również mniejsza skrzynia zawierająca zasilanie typu UPS.

Zewnętrzny komputer PC może być transportowany osobnym pojazdem samochodowym (z użyciem osobnej skrzyni transportowej) dla potrzeb pracy w terenie. Komputer ten zapewnia kierowanie ruchem radaru mobilnego za pośrednictwem konsoli. Jednak, kluczową jego rolą jest realizowanie wizualizacji rezultatów skanowania. Moc obliczeniowa komputera (szybka jednostka 8 rdzeniowa) została wzmocniona 400 rdzeniową kartą graficzną GP-GPU nVidia. Efekty wizualizacji można obserwować również poprzez okulary 3D. Oprócz wizualizacji, zaimplementowana została także aplikacja automatycznej klasyfikacji wykrywanych obiektów. Z użyciem uczenia maszynowego pozwala ona, z dużą dozą pewności, na rozpoznawanie kształtu wykrywanego obiektu.

Kierowanie radarem mobilnym w warunkach polowych jest trudne, bo wymaga bieżącego podpatrywania zachowania się pojazdu. Z tego względu radar mobilny został wyposażony w moduł czujników akcelerometrycznych, GPS oraz kamerę 3D. Elementy te pozwalają śledzić trajektorię ruchu pojazdu i określać jego pozycje. Inną, wdrażaną opcją jest możliwość autonomicznego skanowania obszaru terenu (łączenia skanowanych pasów) bez udziału operatora.

### 4. Przykładowe wyniki

Na rys. 6 przedstawione zostały wstępne, przykładowe wyniki skanowania gruntu w warunkach laboratoryjnych. Mina przeciwczołgowa typu metalowego (ćwiczebna) została umieszczona na głębokości 5 cm pod powierzchnią ziemi torfowej. Pierwszy obraz od lewej strony (a) jest wydzieloną warstwą względem poziomu gruntu (na wysokości powierzchni miny). Środkowy obraz (b) jest przekrojem środkowym miny prostopadłym do ruchu pojazdu. Trzeci obraz (c), to zdjęcie ilustrujące ułożenie miny w gruncie (po jej odsłonięciu).



Rys. 6. Przykładowa wizualizacja miny przeciwczołgowej: a) wydzielona warstwa obrazowania, b) przekrój obrazowania miny prostopadły do ruchu pojazdu, c) ułożenie miny w gruncie po jej odsłonięciu  
Fig. 6. Example of anti-tank mine visualization: a) arbitrary selected layer of imaging, b) B-scan in the middle of mine, c) mine in the ground exposed

Obydwa obrazy (a i b) są rezultatem złożenia sygnału bezpośrednio po syntezie impulsu, bez rekonstrukcji. Mimo to, na wydzielonej warstwie doskonale widać zarys miny. W przekroju (b) mina nie jest już tak łatwo rozpoznawalna wzrokowo. Obraz zawiera charakterystyczne hiperbole odzwierciedlające rozpraszanie wiązki radarowej na obiekcie, w miarę przesuwania się nad obiektem anten. Taka forma obrazowania jest korzystniejsza w procesie automatycznej klasyfikacji obiektów, gdyż nie są zacierane, poprzez nieliniowości rekonstrukcji obrazu, istotne szczegóły informacji o obiekcie.

### 5. Wnioski

Celem publikacji było przedstawienie skuteczności użycia technologii FPGA w integracji złożonych systemów o charakterze interdyscyplinarnym, na przykładzie radaru wizualizacji podpowierzchniowej. Część implementacji FPGA została wykonana specjalnie dla potrzeb tego projektu, inne znajdują się w urządzeniach zakupionych jako gotowe. Gdyby wyobrazić sobie, że technologia FPGA nie istniałaby, to główny wysiłek realizacji projektu skupiny byłby na budowaniu złożonej, zawodnej i trudnej do zmodyfikowania logicznej struktury sterowania i transmisji danych.

*Publikacja przedstawia wybrane rezultaty prac wykonywanych zgodnie z umową nr 0091/R/TOO/2010/12, o wykonanie projektu rozwojowego Nr 0 R00 0091 12 z dn. 30-11-2010, zawartą z Ministrem Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

### 6. Literatura

- [1] David J. Daniels: Ground Penetrating Radar - 2nd Edition, 2004: The Institution of Electrical Engineers, ISB NO8634 136 0.
- [2] Harry M. Jol: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Elsevier B.V., 2009, ISBN: 978-0-444-53348-7.
- [3] Alexander Chenakin: Frequency Synthesizers, ARTECH HOUSE, INC., 2011, ISBN 13: 978-1-59693-230-2.