

Obrazy wysokiej jakości dla promieniowania X z wykorzystaniem detektorów pikselowych

Streszczenie. Artykuł opisuje wykorzystanie hybrydowych detektorów promieniowania X do wysokiej jakości obrazowania cyfrowego. Przedstawione są zalety i wady binarnego przetwarzania sygnału z detektora ze wskazaniem na jego krytyczne elementy związane z jakością obrazu, tj. niski poziom szumów oraz jednorodność kanałów w układzie scalonym. Zaprezentowane rozwiązanie, wykorzystujące przetworniki korekcyjne w każdym kanale, pozwala na zmniejszenie rozrzutów. Aby jednak mogły one być efektywnie stosowane w praktycznej aplikacji niezbędne jest wypracowanie efektywnego algorytmu korekcji umożliwiającego wykonanie całej procedury w czasie poniżej jednej minuty.

Abstract. The article describes the use of hybrid pixel detector for high quality digital X-ray imaging. Both pros and cons of binary readout are discussed with two critical parameters, namely a low noise level and an offset spread among readout channels, which are the main sources of decreasing image quality. Presented solution, which uses the trimming circuit in every readout channel allows minimization of the offset spread. They require however an effective and fast algorithms for finding an optimum value in less than a minute to be used in practical application. **The use of hybrid pixel detector for high quality digital X-ray imaging**

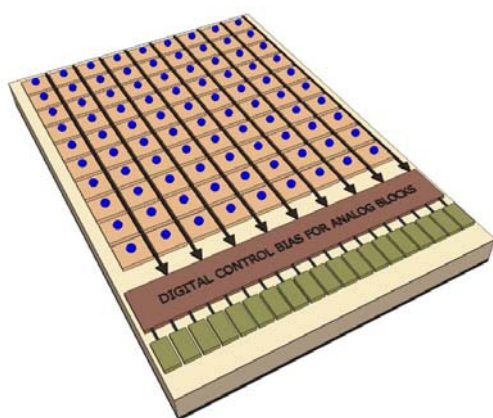
Słowa kluczowe: obrazowanie dwuwymiarowe, korekcja

Keywords: imaging, X-ray

doi:10.12915/pe.2014.09.18

Wstęp

Dwuwymiarowe układy odczytowe dla detektorów pikselowych można podzielić na dwie grupy biorąc pod uwagę sposób przetwarzania sygnału wejściowego [1]. Pracujące w trybie integracyjnym sensory CCD pozwalają na osiągnięcie bardzo małych (poniżej $30 \times 30 \mu\text{m}^2$) pikseli, jednak sposób akwizycji sygnału, polegający na „doładowaniu” pojemności kolejnymi impulsami, powoduje jednocześnie całkowanie szumów w czasie akwizycji, co zmniejsza kontrast otrzymywanych obrazów. W tym względzie znacznie atrakcyjniejsze są systemy pozwalające na zliczanie pojedynczych fotonów o energii znajdującej się w określonym przedziale. Wymaga to odpowiedniego toru przetwarzania sygnału analogowego w każdym kanale (piksela) niezależnie. Powoduje to wzrost rozmiaru piksela, jednak niewątpliwą zaletą jest eliminacja kumulacji szumów związanych z ilością wpadających do detektora cząstek. Nowoczesne hybrydowe detektory pikselowe pracujące w trybie zliczania pojedynczych fotonów podążają w stronę zwiększania funkcjonalności pojedynczego piksela przy zachowaniu niewielkich rozmiarów pikseli odczytowych. Jest to możliwe dzięki najnowszym sub-mikronowym technologiom, pozwalającym mimo rozbudowanej funkcjonalności budować pojedyncze komórki o rozmiarach poniżej $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Układy odczytowe (rys. 1), łączy się z sensorem (detektorem krzemowym) techniką bump-bondingu, a każdy piksel zawiera określoną funkcjonalność.

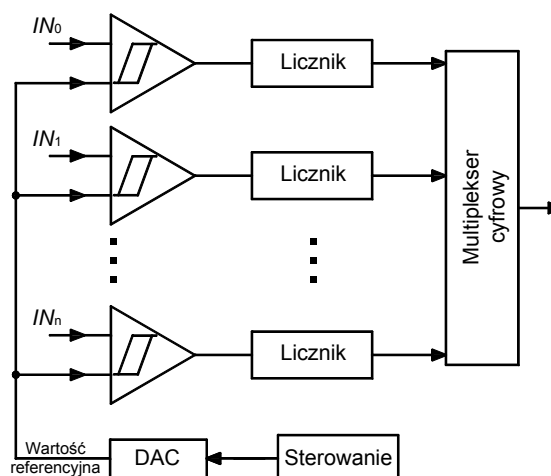


Rys.1. Poglądowy rysunek układu elektroniki odczytu detektorów pikselowych

Budowa dużych układów, zawierających dziesiątki tysięcy pikseli, od których wymaga się dużej jednorodności jest olbrzymim wyzwaniem dla projektantów układów scalonych. W artykule przedstawiono główne ograniczenia wielokanałowych układów o architekturze pikselowej, działających w trybie zliczania pojedynczych fotonów, a jednocześnie przedstawiono efektywne metody minimalizacji efektów niedopasowania będących głównym źródłem obniżania jakości finalnego obrazu.

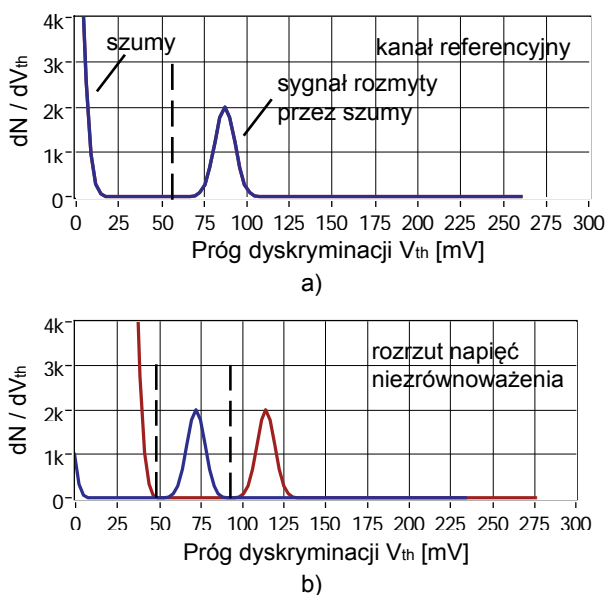
Zalety i wyzwania odczytu binarnego

Typowy schemat układu wielokanałowego działającego w trybie zliczania pojedynczych fotonów przedstawiono na rysunku 2. Sygnał z detektora po wzmocnieniu i ukształtowaniu stosownie do wymagań czasowych podawany jest na wejście dyskryminatora, którego wyjściem jest binarna informacja (TAK / NIE) mówiąca o przekroczeniu przez wpadającą do detektora cząstkę zadanego poziomu energetycznego. Napięcie referencyjne, z którym dyskryminator porównuje sygnał wejściowy jest zadawane globalnie dla wszystkich kanałów. Impulsy pojawiające się na wyjściu dyskryminatorów pobudzają liczniki do inkrementowania swojej wartości, która wysyłana jest dalej do systemu nadrzędnego przez specjalnie zaprojektowany układ logiczny [2].

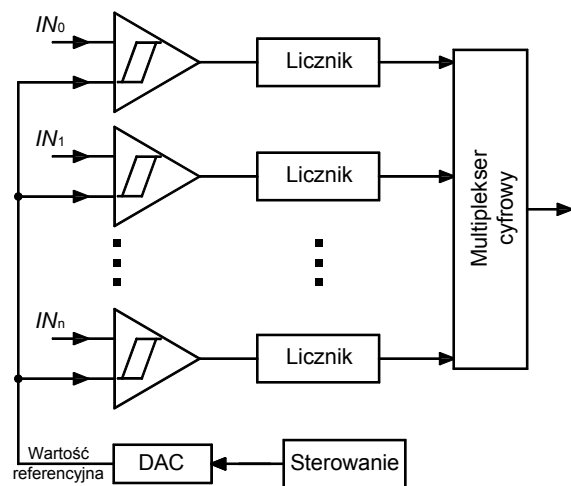


Rys.2. Typowy schemat wielokanałowego układu odczytowego pracującego w trybie zliczania pojedynczych fotonów

Architektura binarna systemu odczytowego pozwala na asynchroniczne przetwarzanie i zliczanie impulsów uwzględniając przy tym informację o ich amplitudzie (przy zastosowaniu dwóch niezależnie pracujących dyskryminatorów). Ceną jest tutaj duża wrażliwość na szumy toru elektroniki oraz na rozrzut offsetów na wejściach dyskryminatorów. Problem zobrazowano na rysunku 3, który przedstawia tzw. różniczkowy rozkład amplitudowy impulsów otrzymany przez pomiar widma całkowego (tj. pomiar liczby wpadających do detektora impulsów w zależności od zadanego napięcia referencyjnego) i poddanie go operacji różniczkowania. Jeżeli w układzie wielokanałowym o architekturze binarnej szumy są za wysokie lub, gdy za duży jest rozrzut napięć niezrównoważenia dyskryminatorów, to ustawienie wspólnego progu dyskryminacji dla wszystkich kanałów przy pracy z niewielką amplitudą impulsów wejściowych jest po prostu niemożliwe [3].



Rys.3. Rozkłady amplitudowe impulsów wyjściowych uzyskane dla układu scalonego o architekturze binarnej: a) kanał referencyjny, b) kanały z rozrzutem napięć niezrównoważenia dyskryminatorów [3]



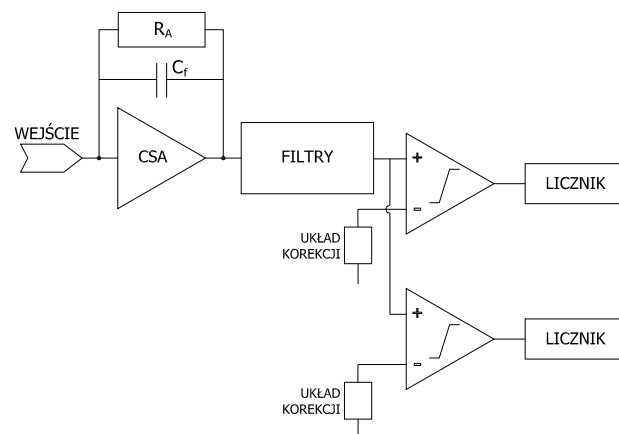
Rys.4. Typowy schemat wielokanałowego układu odczytowego pracującego w trybie zliczania pojedynczych fotonów z zastosowaniem przetworników korekcyjnych

Efektywnej korekcji napięć niezrównoważenia dyskryminatorów (nawet w układach o architekturze pikselowej, gdzie powierzchnia pojedynczego piksela jest

niewielka) można dokonać poprzez zastosowanie korekcyjnych przetworników cyfrowo-analogowych, które we współczesnych technologiach sub-mikronowych zajmują niewielką powierzchnię. Ideę schematycznie przedstawia rysunek 4, gdzie na wejściu każdego z dyskryminatorów znajduje się n-bitowy, niewielki przetwornik korekcyjny.

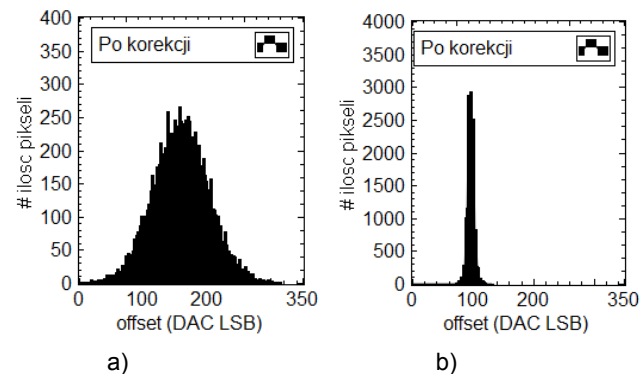
Prototypowy scalony układ z cyfrową korekcją napięć niezrównoważenia

Aby przetestować możliwości współczesnych technologii submikronowych zaprojektowano i wykonano prototyp układu scalonego o architekturze pikselowej zawierającego 23552 pikseli. Układ ten przeznaczony jest do obrazowania 2D z wykorzystaniem promieniowania X. Dodatkowo aby móc zliczać fotony tylko o określonej energii wprowadzono w każdym pikselu po 2 niezależnie pracujące dyskryminatory. Schemat pojedynczego piksela pokazano na rysunku 5.



Rys.5. Schemat pojedynczego kanału toru elektroniki pracującej w trybie zliczania pojedynczych fotonów z możliwością ich dyskryminacji zadanym oknem energetycznym (dwa niezależnie pracujące dyskryminatory)

Każdy z impulsów prądowych pochodzący z detektora jest całkowany we wzmacniaczu ładunkowym, potem filtrowany i formowany stosownie do wymagań czasowych w układzie kształtującym, a następnie podawany na układ dwóch dyskryminatorów. Każdy z dyskryminatorów posiada niezależnie działające 6-bitowe przetworniki korekcyjne. Rozrzut napięć niezrównoważenia w całej maczyz pikseli przed i po włączeniu przetworników korekcyjnych przedstawiają histogramy na rysunku 6.



Rys.6. Histogram rozrzutów przed a) i b) po włączeniu układów korekcji

Kolejnym istotnym elementem jest czas korekcji układu scalonego. Należy zaznaczyć, że np. wraz ze zmianą

temperatury w jakiej pracuje układ scalony zmieniają się również wartości napięć niezrównoważenia, konieczne jest zatem wypracowanie takich efektywnych metod korekcji, które pozwolą na ponowne skalibrowanie układu w bardzo krótkim czasie. W tym celu wypracowano efektywną metodę korekcji napięć niezrównoważenia, która bazuje na pomiarze w układzie o architekturze binarnej zliczeń pochodzących od szumów w zależności od ustawienia wartości przetwornika korekcyjnego. W metodzie zadawany jest pewien stały poziom dyskryminacji, następnie dobierane są wartości przetworników korekcyjnych w każdym kanale tak, aby zarejestrowana była maksymalna ilość zliczeń. Wymaganie wartości maksymalnej jest niezbędne ze względu na brak monotoniczności charakterystyk przetworników korekcyjnych oraz symetrię charakterystyki szumowej, która dla dużej ilości statystyki dąży do rozkładu Gaussa. Przeprowadzenie procedury dla wszystkich 23552 kanałów zajmuje ok. 2 minut. Czas ten ulegnie radykalnemu skróceniu do ok. 40 sekund pod warunkiem zastosowania układu FPGA w systemie odczytowym.

Chciałbym wyrazić swoje podziękowania prof. Pawłowi Grybosowi oraz dr hab. Robertowi Szczygłowi z AGH w Krakowie. Prace związane z obrazowaniem dwuwymiarowym wspierane były przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w projekcie nr PBS1/A3/12/2012 w latach 2012-2015.

LITERATURA

- [1] Rossi L., Fisher P., Rohe T., Wermes N., Pixel detectors. From fundamentals to applications, Springer-Verlag, 2006
- [2] Grybos P., Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems, Warsaw University of Technology Publishing House, Warsaw 2010, Poland, 1-187
- [3] Maj P., Zintegrowany, wielokanałowy system pomiarowy do detekcji niskoenergetycznego promieniowania X o dużym natężeniu, PhD Thesis, AGH, Kraków 2008

Autor: dr inż. Piotr Maj, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: piotr.maj@agh.edu.pl