

Analiza porównawcza standardów MPEG-2 i H.264/AVC pod kątem liczby programów w multipleksie

*Alina Karwowska-Lamparska,
Andrzej Chudziński, Justyn Połujan*

Przeprowadzono analizę porównawczą standardów kodowania MPEG-2 i H.264/AVC z punktu widzenia liczby programów telewizyjnych w multipleksie. Na podstawie dostępnych dokumentów normalizacyjnych i wyników badań przedstawiono właściwości standardu MPEG-2, MPEG-4 oraz H.264/AVC, a także zakresy ich stosowania i dostępność sprzętu. Stwierdzono, że standard H.264/AVC, umożliwiający przesłanie w multipleksie dwukrotnie większej liczby programów niż standard MPEG-2, jest standardem przyszłościowym i ma coraz szersze zastosowanie. Celowe jest więc wprowadzenie jego próbnych emisji w Polsce.

telewizja, multipleks, standardy MPEG-2 i H.264/AVC

Wprowadzenie

W ustawie o radiofonii i telewizji [7, art. 37] zobligowano Krajową Radę Radiofonii i Telewizji do określenia programów nadawanych w dwóch pierwszych multipleksach. W związku z tym należało dokonać analizy porównawczej standardów kodowania sygnału wizyjnego, które mogą być wprowadzane do emisji w Polsce.

Analiza obejmowała standardy MPEG-2 i H.264/AVC. Dotyczyła ona wyłącznie aspektów technicznych.

Ogólne właściwości standardu MPEG-2

Standard MPEG-2 jest pierwszym standardem cyfrowym, opracowanym pod kątem zastosowania w telewizji programowej. Określono w nim metodę kompresji i kodowania sygnału wizyjnego, fonii oraz danych dodatkowych.

W standardzie tym można transmitować zarówno obrazy wytwarzane w standardzie europejskim 625 linii/50 Hz, jak i w amerykańskim 525 linii/60 Hz. Dopuszczalne są również różne formaty obrazu, w tym 4:3 i 16:9; wybieranie może być międzyliniowe lub kolejnoliniowe.

Metody kodowania w standardach MPEG należą do metod nieodwracalnych, tzn. takich, w których część informacji nieistotnych w odtwarzanym obrazie jest bezpowrotnie tracona. Przy kompresji sygnału są wykorzystywane:

- korelacja przestrzenna (wewnątrzobrazowa),
- korelacja czasowa,
- właściwości wzroku człowieka,
- właściwości statystyczne programu.

Metoda kompresji jest oparta na kodowaniu hybrydowym, którego podstawą jest wewnątrzpolowa transformacja kosinusowa (DCT) oraz międzypolowe kodowanie z prognozowaniem i kompensacją

ruchu. W podlegającym kompresji sygnale analogowym, dzięki wykorzystaniu właściwości wzroku człowieka, stosuje się ponad dwukrotne ograniczenie pasma chrominancji w stosunku do pasma luminancji. Korelację przestrzenną (wewnątrzobrazową) wykorzystuje się dzięki zastosowaniu dyskretnej transformacji kosinusowej DCT (*Discrete Cosine Transform*).

Dyskretna transformacja kosinusowa jest linearną transformacją dwuwymiarową. Ma następujące zalety:

- wykorzystywanie w bardzo dużym stopniu korelacji między elementami obrazu,
- zgrupowanie współczynników o znaczących amplitudach w ograniczonej części transformowanej płaszczyzny,
- transformacja rzeczywista z podstawowymi funkcjami sinusoidalnymi,
- proces odrzucania współczynników lub modyfikacji i kwantowania ich amplitud bardzo podobny do procesu filtracji linearnej w obecności szumu.

W dyskretnej transformacji kosinusowej (DCT) przesyłany obraz jest dzielony na małe podobrazy o wymiarach 8×8 elementów, zależnie od zastosowania. Elementy każdego podobrazu są próbkowane i przesyłane do kodera dyskretnej transformacji kosinusowej. Transformacja jest przeprowadzana dla każdego elementu indywidualnie, a więc podobraz 8×8 próbek jest przetransformowany na blok 8×8 współczynników (transformant), które reprezentują oryginalny podobraz w dziedzinie częstotliwości. Proces transformacji powoduje zgromadzenie większości informacji z obrazu oryginalnego w jednym współczynniku transformacji kosinusowej. Poziom tego współczynnika jest duży, natomiast poziomy pozostałych są małe.

Dla większości transformowanych podobrazów tylko niewielka część współczynników jest znacząco różna od zera, a jedynie te współczynniki muszą być kodowane i przesyłane. W typowych obrazach telewizyjnych amplitudy współczynników dotyczących wyższych częstotliwości przestrzennych są zwykle bliskie zeru. Liczba ich, podobnie jak liczba znaczących współczynników, zależy od treści podobrazów. Po kwantowaniu współczynniki są grupowane w strumień danych. Stosuje się wówczas specjalne metody wyboru współczynników, zwane metodami klasyfikacji podobrazów (*blok classification*), polegające na wybieraniu współczynników wzdłuż linii ukośnych, tzw. *zigzag scanning*.

Wykorzystując właściwości statystyczne sygnału, współczynniki dyskretnej transformacji kosinusowej są kodowane ze zmienną długością słowa. Ogólna zasada kodowania o zmiennej długości słowa (VLC) polega na przypisaniu każdemu symbolowi słowa kodowanego liczby bitów odwrotnie proporcjonalnej do prawdopodobieństwa jego występowania.

W korelacji czasowej sygnału wykorzystuje się zasadę prognozowania z kompensacją ruchu, która polega na oszacowaniu ruchu różnych obiektów, między polami (lub między kolejnymi obrazami) i tworzenia prognozy kierunku ruchu. Podstawowym elementem tej metody jest sposób oszacowania przemieszczania się elementów (ruchu). Oszacowanie to jest najczęściej oparte na informacjach kodowanych poprzednio.

Stosowana metoda, tzw. dopasowywanie bloków, polega na określeniu zależności między ruchomymi częściami obrazu i obrazu nadawanego poprzednio. Obraz jest podzielony na bloki, a kompresję ruchu przeprowadza się dwuetapowo. W pierwszym etapie następuje oszacowanie ruchu, tj. przeszukiwanie poprzednio nadawanego obrazu, znalezienie bloku odpowiadającego danemu blokowi i wykonanie ortogonalnego rzutu analizowanego bloku na ten obraz. W drugim etapie jest przeprowadzana kompensacja ruchu, tj. obliczenie wektora przemieszczenia analizowanego bloku (między poprzednim

jego położeniem i jego rzutem ortogonalnym) oraz wykorzystanie go do tworzenia prognozy. Metoda ta wymaga przesyłania informacji o wektorze przemieszczenia dla każdego bloku, powoduje więc zwiększenie szybkości przesyłanego sygnału. Nie jest natomiast konieczne przeprowadzenie w dekodерze dodatkowych obliczeń kompensacji ruchu.

W standardzie MPEG-2 obrazy są połączone w grupy o ustalonej strukturze dla całej sekwencji. Grupy zawierają określoną liczbę obrazów. Dopuszczalne są trzy sposoby kodowania sygnałów poszczególnych obrazów w grupie:

- obrazy typu I (kodowane wewnątrzobrazowo), w których prognozę tworzy się tylko z informacji w nich zawartych, tj. położonych na tych samych lub sąsiednich liniach wybierania;
- obrazy typu P (kodowane z prognozowaniem międzyobrazowym), w których prognozę tworzy się z informacji zawartych we wcześniejszym obrazie i informacji o przemieszczeniu elementów danego obrazu w stosunku do elementów wcześniejszego obrazu (wektorze ruchu);
- obrazy typu B (kodowane z prognozowaniem dwukierunkowym) w których prognozę tworzy się podobnie jak w przypadku obrazów typu P, ale odniesieniem dla nich są dwa obrazy (wcześniejszy i późniejszy), zapewniające największy stopień kompresji.

Standard nie narzuca struktury sygnału wizyjnego; liczba obrazów poszczególnych typów w grupie obrazów zależy od konkretnej realizacji kodera.

Standard MPEG-2 może być wykorzystywany do kodowania obrazów o różnej rozdzielczości z zastosowaniem różnych wariantów kompresji sygnałów. W tym celu wprowadzono dwa podstawowe pojęcia: poziom (*level*) oraz profil (*profile*).

Poziom jest związany z algorytmami wybierania; przyjęto następujące określenia:

- dla telewizji o dużej rozdzielczości obrazu i 1920 próbek na linii, tzw. poziom wysoki 1920;
- dla telewizji o dużej rozdzielczości obrazu i 1440 próbek na linii, tzw. poziom wysoki 1440; liczba linii czynnych dla obu tych poziomów wynosi 1152;
- dla telewizji konwencjonalnej, tzw. poziom główny o rozdzielczości 720 punktów \times 576 linii, który może być również wykorzystywany w systemach o poprawionej jakości (o rozszerzonym formacie obrazu);
- dla telewizji o małej rozdzielczości obrazu (352 punkty \times 288 linii), tzw. poziom niski.

Sygnałami wejściowymi są zawsze sygnały składowe telewizji kolorowej.

W każdym z tych poziomów można stosować różne metody kompresji sygnału, aby uzyskać różne szybkości przesyłania. Parametry te nazwano profilem.

W standardzie przyjęto pięć podstawowych profili:

- profil prosty,
- profil główny,
- profil skalowany szumowo (SNR *scalable*),
- profil skalowany przestrzennie,
- profil wysoki.

Szybkość bitowa przesyłanego sygnału zależy od kombinacji poziom/profil i wynosi dla telewizji konwencjonalnej (SDTV) $2 \div 4$ Mbit/s, a dla telewizji dużej rozdzielności (HDTV) $8 \div 10$ Mbit/s.

Potwierdzona wynikami badań szybkość, przy transmisjach eksperymentalnych sygnałów SDTV, kodowanych według standardu MPEG-2, przy jakości odtwarzanego obrazu równorzędnej jakości obrazu analogowego, wynosi średnio 3,5 Mbit/s.

Minimalne szybkości bitowe dla standardu MPEG-2 oraz jakości SDTV zależą od treści przesyłanego obrazu i wynoszą około 3,5 Mbit/s, natomiast dla obrazów krytycznych (o dużej zawartości ruchu) do 4,5 Mbit/s.

Ogólne właściwości standardu MPEG-4 i H.264/AVC

Szeroko stosowany w praktyce MPEG-2 został ulepszony w 1991 r. przez grupę MPEG i nazwany standardem MPEG-4, zgodnym z normą ISO/IEC [4]. Standard ten wykorzystuje bardziej zaawansowane techniki kompresji oraz wiele dodatkowych narzędzi, umożliwiających kodowanie i manipulowanie mediami cyfrowymi. Rozwiązania te są oparte na znanym modelu kodowania hybrydowego DPCM/OCT, a podstawowe funkcje modelu są wspomagane, np. zwiększeniem wydajności kompresji, niezawodności transmisji, kodowaniem niezależnych obiektów sceny wizyjnej, kompresją opartą na siatce oraz ożywianiem twarzy i modeli ludzkich. Jest to standard bardzo skomplikowany o równie skomplikowanym oprogramowaniu. Oczywiście nie każde zastosowanie wymaga użycia wszystkich możliwości standardu. W standardzie MPEG-4 opisano wiele profili grupujących narzędzia dla poszczególnych zastosowań, między innymi: wydajne kodowanie ramek wizyjnych, kodowanie wizyjne dla zawodnych sieci transmisyjnych, kodowanie i manipulację oparte na obiekcie, kodowanie syntetycznych, hybrydowych i syntetyczno-naturalnych scen oraz interaktywne zastosowania wizyjne. Jednak z punktu widzenia zastosowań, najbardziej są potrzebne narzędzia profilu kodowania prostego i ulepszego prostego oraz wydajnego kodowania prostokątnych ramek. Wymagania takie spełnia standard H.264/AVC, opracowany w 2003 r. w celu zastąpienia standardu MPEG-4, opublikowany w normie [4] i zaleceniu ITU-T [5].

Podobnie jak koder standardu MPEG-2, koder standardu H.264/AVC jest koderem hybrydowym z kompensacją ruchu.

W standardzie H.264/AVC wprowadzono pewne innowacje dotyczące sposobu kodowania obrazów w sekwencji wizyjnej, a mianowicie:

- każdy obraz w sekwencji może być zakodowany niezależnie jako ramka (*frame*), pola (*fields*) oraz w trybie adaptacyjnym MBAFF;
- może być więcej niż jeden obraz odniesienia zarówno na liście odniesienia wstecz, jak i w przód;
- obrazy mogą być kodowane praktycznie w dowolnej kolejności.

Wartości próbek obrazu i wektory ruchu są wyliczane na podstawie prognozy danych zawartych w sąsiadujących blokach 4×4 .

Obrazy kodowane w trybie międzyobrazowym (P i B) są rekonstruowane przy użyciu jednego lub więcej obrazów odniesienia, występujących w sekwencji wcześniej lub później w stosunku do bieżącego obrazu.

Każdy z makrobloków może zostać podzielony w procesie kodowania na prostokątne fragmenty o rozmiarach 16×8 , 8×16 , 8×8 , 8×4 , 4×8 oraz 4×4 próbki luminancji.

W standardzie H.264/AVC zdefiniowano dwa ogólne schematy prognozy wektorów ruchu: prognozy kierunkowej dla makrobloków podzielonych na prostokąty o rozmiarze 16×8 i 8×16 oraz adaptacyjnej prognozy medianowej dla pozostałych przypadków.

W standardzie stosuje się tryby kodowania makrobloku z pomijaniem całości (SKIP) lub części danych (DIRECT). Tryby kodowania makrobloków pomijanych SKIP i DIRECT są szczególnymi trybami prognozy z kompensacją ruchu, występującymi w obrazach typu P i B. Dla tych makrobloków w strumieniu binarnym nie są przesyłane żadne dane (SKIP) lub są przesyłane wyłącznie współczynniki transformaty błędów prognozy (DIRECT).

Standard H.264/AVC jest standardem wizyjnym, natomiast standardy kodowania dźwięku towarzyszącego są takie same, jak dla standardu MPEG-2. Standard ten dotyczy wyłącznie kodowania źródłowego, jest przesyłany za pomocą strumienia transportowego MPEG-2 TS, podobnie jak w MPEG-2.

Zasadnicze różnice między MPEG-2 a H.264/AVC

Poniżej wymieniono podstawowe różnice między standardem MPEG-2 a standardem H.264/AVC:

- 1) adaptacyjny podział makrobloków od 16×16 do 4×4 próbek luminancji na blok;
- 2) kodowanie adaptacyjne sekwencji wizyjnych – na poziomie obrazu (PAFF) oraz na poziomie makrobloków (MBAFF);
- 3) specjalne tryby rekonstrukcji makrobloków z pomijaniem danych (SKIP i DIRECT);
- 4) zaawansowanie prognozowania wewnątrzobrazowego;
- 5) zaawansowanie prognozowania międzyobrazowego z większą niż jeden liczbą obrazów odniesienia;
- 6) transformata całkowitoliczbowa błędów prognozowania w blokach o wielkości 4×4 próbki;
- 7) kontekstowe kodowanie entropijne – kodowanie o zmiennej długości (VLC) lub kontekstowym adaptacyjnym koderem adaptacyjnym (CABAC);
- 8) transformata całkowitoliczbowa błędów prognozy w blokach o wielkości 4×4 próbki;
- 9) specjalne tryby rekonstrukcji makrobloków z pomijaniem danych (SKIP i DIRECT);
- 10) zaawansowane narzędzia do kodowania sekwencji wizyjnych z przeplotem (PAFF oraz MBAFF);
- 11) wieloobrazowa kompensacja ruchu z wykorzystaniem jako odniesienia poprzednio kodowanych obrazów, znacznie bardziej elastycznie niż w poprzednich standardach, tj. umożliwiających stosowanie 32 obrazów odniesienia oraz wiele innych, bardzo „wyrafinowanych” szczegółów technicznych.

Zakres stosowania standardów

Standard MPEG-2 znalazł zastosowanie w wielu dziedzinach transmisji, przetwarzania i przechowywania treści telewizyjnych, np.:

- w telewizji programowej satelitarnej DVB-S, kablowej DVB-C i naziemnej DVB-T;
- w telewizji wysokiej rozdzielczości HDTV, w ograniczonym zakresie;
- w telewizji płatnej;
- w zapisie na nośnikach DVD.

Standard H.264/AVC ma więcej zastosowań, oprócz takich jak MPEG-2, a mianowicie:

- w telewizji w telefonii trzeciej generacji;
- w technikach militarnych NATO;
- w telewizji w mediach strumieniowych;
- w telekonferencjach;
- w zapisie na nośnikach HD-DVD oraz Blu-ray Disk;
- w usługach wideo na życzenie w sieciach internetowych;
- w piątej generacji iPod do odtwarzania sekwencji wizyjnych firmy Apple;
- w przenośnych stacjach gier Playstation Portale firmy Sony.

Standard ten zastosowano w telewizji naziemnej we Francji, USA, Rosji, Niemczech i Korei Płd. We Francji standard H.264/AVC zastosowano dla telewizji HDTV i w programach płatnych, natomiast w Niemczech i Rosji – dla HDTV.

W Japonii wprowadzono usługę odbioru telewizji w ruchu ISDB-T w sieciach głównych dostawców: NHK, Tokyo Broadcasting System (TBS), Nippon Television (NTV), TV Asahi, Fuji TV oraz TV Tokyo.

Bezpośredni odbiór z satelity zapewniają nadawcy: DirecTV (w USA), Dish Network (w USA), Euro1080 (w Europie), Premiere (w Niemczech), ProSieben HD & Sat1 HD (w Niemczech) oraz BSkyB (w Zjednoczonym Królestwie i Irlandii).

Producenci sprzętu

Kodery H.264/AVC są produkowane między innymi przez firmy: Tanberg, Polycom i Mainconcept.

Układy scalone do *set-top-box*-ów oraz *set-top-box*-y dostarczają między innymi firmy: Broadcom BCM7411, Conexant CX2418X, Sigma Designs SMP8630, EM8622L i EM8624L, STMicroelectronics STB7100, NOMADIK (STn 8800/8810/8815 series), WISchip DeCypher 8100 oraz ADB ADVANCED DIGITAL BROADCAST.

Firma ADB Polska jest gotowa do rozpoczęcia natychmiast masowej produkcji dekoderek multi-systemowych MPEG-2 i H.264/AVC, a produkcji dekoderek jednosystemowych H.264/AVC za pół roku. Firma RWT Radom, produkująca dekodery MPEG-2, będzie gotowa do produkcji dekoderek H.264/AVC w połowie 2006 r. Wszystkie firmy wstrzymują się z podjęciem produkcji, oczekując na decyzję o wyborze standardu w Polsce.

Wnioski

Na podstawie analizy porównawczej opisywanych standardów można sformułować następujące wnioski.

- Standard H.264/AVC zapewnia przy takiej samej subiektywnie ocenianej jakości obrazu uzyskanie dla jednego programu telewizyjnego prędkości bitowej o połowę mniejszej niż standard MPEG-2.
- Obydwa standardy wymagają oprogramowania, które przy obecnym stanie techniki jest co kilka lat wymieniane na nowocześniejsze. Biorąc to pod uwagę, standard MPEG-2 staje się już przestarzały.

- Kodowanie w obydwu standardach jest nieodwracalne, tzn. informacje stracone w procesie kodowania zostają stracone bezpowrotnie i nie można ich odtworzyć, co ma wpływ na jakość odtwarzanych obrazów.
- Standard H.264/AVC wchodzi coraz szerzej do eksploatacji, szczególnie w HDTV i telewizji płatnej.
- Przy rozważaniu zawartości multipleksu należy uwzględnić sygnały fonii towarzyszącej i danych. Sygnały fonii stereofonicznej wymagają przepływności 192 kbit/s, fonia w systemie Dolby Sourrand 256 kbit/s, a fonia AC3 448 kbit/s. Ponadto w multipleksie są przesyłane sygnały teletekstu ze średnią szybkością 200 kbit/s, sygnały EPG około 500 kbit/s oraz inne usługi dodane (np. aplikacje interaktywne) od kilkuset do megabitów na sekundę. Dodatkowo trzeba uwzględnić, że w multipleksie należy przesyłać: jednocześnie fonię dwukanałową i fonię AC3, dla kilku programów, a także programy radiowe Polskiego Radia. Program TVP3 – ze względu na konieczność transmisji regionalnych bloków programowych – powinien być przesyłany poza multipleksem statystycznym, co obniża możliwości kompresji multipleksu.
- W przypadku standardu H.264/AVC w multipleksie można przesłać dwukrotnie większą liczbę programów telewizyjnych niż w standardzie MPEG-2. Na przykład przy multipleksie 20 Mbit/s i przesyłaniu sygnałów kodowanych MPEG-2 zakłada się przesyłanie 4 sygnałów wizyjnych z szybkością średnio 4 Mbit/s, co wymaga przepływności 16 Mbit/s. Sygnały foniczne i inne sygnały nadawane obligatoryjnie wymagają około 2 Mbit/s. Na przesłanie piątego programu o zadowalającej jakości nie ma już miejsca. Przy przesyłaniu sygnałów wizyjnych kodowanych w standardzie H.264/AVC liczba sygnałów wizyjnych jest dwukrotnie większa.

Podsumowując, można stwierdzić, że:

- standard H.264/AVC jest standardem przyszłościowym, znajduje bowiem coraz szersze zastosowanie, natomiast standard MPEG-2 staje się standardem przestarzałym i będzie stopniowo wypierany przez rozwiązania nowocześniejsze, dające znacznie szersze możliwości;
- coraz większa liczba producentów sprzętu odbiorczego już produkuje lub rozpoczyna produkcję dekodatorów H.264/AVC (w tym również RWT Radom planuje rozpoczęcie produkcji dekodera H.264/AVC w połowie 2006 roku);
- przewodniczący Grupy Studiów 6 (radiofonia i telewizja) ITU-R zaleca wykorzystanie standardu H.264/AVC w telewizyjnych systemach emisyjnych;
- standard H.264/AVC umożliwia przesyłanie w multipleksie dwukrotnie większej liczby programów telewizyjnych.

W Polsce nie ma jeszcze emisji cyfrowej telewizji. Wydaje się, że należy wprowadzić standard H.264/AVC do próbnych emisji, celem oceny jego właściwości transmisyjnych.

Bibliografia

- [1] *An EBU „route map” to high definition (HD)*. EBU – Tech. 3298, Geneva, EBU, 2004
- [2] Buniaev S.: *HDTV in Russian Federation*. Geneva, EBU, 2005
- [3] Dardayrol J.-P.: *Television numerique: enjeux et perspectives en 2005*. GTI Rapport no. II-B.2, Geneva, GTI, 2005
- [4] ISO/IEC 14496-10: 2005 (3rd ed.): *Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 10: Advanced Video Coding*

- [5] ITU-T H.264 (03/2005): *Advanced video coding for generic audiovisual services*
- [6] Lange R., Łuczak A.: *Zawansowane narzędzia kompresji sekwencji wizyjnych w koderze standardu H.264/AVC*. W: Materiały z konferencji KKRRiT, Kraków, 2005
- [7] *Ustawa z dnia 29 grudnia 1992 r. o radiofonii i telewizji*. Dz.U., 1993, nr 7, poz. 34
- [8] Wiegand T., Sullivan G.J., Bjontegaard G., Luthura A.: *Overview of the H.264/AVC Video Coding standard*. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, vol. 13, pp. 560–576

Alina Karwowska-Lamparska



Dr inż. Alina Karwowska-Lamparska (1931) – absolwentka Wydziału Łączności Politechniki Warszawskiej (1956); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1955); specjalny reporter Grupy SG9 ITU-T, przewodnicząca Komitetu Technicznego Nr 11 ds. Telekomunikacji, wiceprzewodnicząca WP 6Q ITU-R, członek Rady Polskiej Platformy DVB i Platformy DAB, Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN, Sekcji Telekomunikacji Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN oraz Polskiego Komitetu Normalizacyjnego II kadencji; autorka lub współautorka licznych publikacji naukowych z zakresu telewizji; długoletni redaktor oraz członek Rady Programowej wielu czasopism, m.in. *TITI*, *JTIT* oraz *Przeglądu Telekomunikacyjnego + Wiadomości Telekomunikacyjnych*; zainteresowania naukowe: telewizja, radiokomunikacja, telekomunikacja, normalizacja.
e-mail: A.Karwowska@itl.waw.pl

Andrzej Chudziński



Mgr inż. Andrzej Chudziński (1944) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1968); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1968); zainteresowania naukowe: telewizja, radiokomunikacja, telekomunikacja.
e-mail: A.Chudzinski@itl.waw.pl

Justyn Połujan



Mgr inż. Justyn Połujan (1944) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1969); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1969); zainteresowania naukowe: telewizja, radiokomunikacja, telekomunikacja.
e-mail: J.Polujan@itl.waw.pl