

# System nawigacji satelitarnej GPS, część 3

## Budowa systemu i struktura sygnałów c.d.

W poprzednim odcinku zapoznaliśmy się z sygnałami systemu NAVSTAR GPS, poznaliśmy też stosowane w nim kody pseudolosowe oraz budowę depeszy nawigacyjnej. To jeszcze nie wszystko. Temat kontynuujemy poniżej.

### Modulacja sygnałów GPS

Fala nośna sygnału L1 jest modulowana zarówno sygnałem zawierającym kod C/A jak i kod P(Y), natomiast fala nośna L2 jest obecnie modulowana wyłącznie sygnałem zawierającym kod P(Y). Trzeba tutaj dodać, że najnowsze wprowadzane do konstelacji satelity GPS nadają już zmodyfikowany sygnał L2, oznaczany jako L2C, zawierający dodatkowo kod C/A, jednak na razie sygnał ten nie jest wykorzystywany w dostępnych na rynku odbiornikach cywilnych.

Sposobem na równoczesne nałożenie dwóch sygnałów modulujących na falę nośną sygnału L1 jest wytworzenie go jako sumy dwóch sygnałów zmodulowanych, których fale nośne mają takie same częstotliwości, ale są przesunięte względem siebie w fazie o  $90^\circ$ . Składowa synfazowa sygnału L1 jest zmodulowana kodem C/A, natomiast przesunięta względem niej w fazie o  $90^\circ$  składowa kwadraturowa L1 jest zmodulowana kodem P(Y). Do nałożenia danych nawigacyjnych i kodów PRN na fale nośne zastosowano dwuwartościową manipulację (kluczowanie) fazy BPSK (*ang. Binary Phase Shift Keying*), w której faza chwilowa fali nośnej zmienia się na przeciwną przy zmianie stanu sygnału modulującego (rys. 12).

Sposób wytwarzania składowej synfazowej sygnału L1 wyjaśniono na rys. 13, natomiast sposób wytwarzania sygnału L2 i składowej kwadraturowej sygnału L1 przedstawiają przebiegi czasowe na

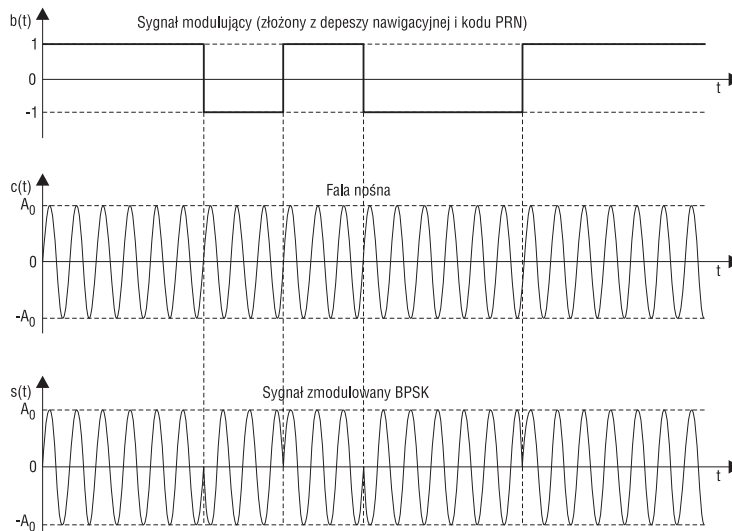
rys. 14. Oba rysunki wyjaśniają również związki czasowe poszczególnych składników wytwarzanych sygnałów zmodulowanych. Wyraźnie widoczna jest pełna synchronizacja ciągu bitów depeszy nawigacyjnej, kodów PRN i fal nośnych. Z rys. 13 wynika, że kolejne bity depeszy nawigacyjnej zaczynają się zawsze w momencie rozpoczęcia co dwudziestej epoki kodu C/A. Na 1 bit danych nawigacyjnych przypada 20 epok kodu C/A, czyli  $20 \cdot 1023 = 20460$  odcinków tego kodu. Jeśli po zakończeniu jednego bitu danych nawigacyjnych kolejny bit ma znak przeciwny, w sygnale modulującym następuje odwrócenie fazy (zmiana stanów na przeciwne) wszystkich 20460 odcinków kodu C/A we wszystkich 20 epokach przypadających na czas trwania tego bitu. Każdy odcinek kodu C/A zawiera 1540 okresów fali nośnej L1. Nazwa „epoka” brzmi nieco zabawnie w odniesieniu do okresu kodu C/A, który trwa zaledwie 1 ms, ale taka nazwa, będąca tłumaczeniem angielskiego słowa *epoch*, została przyjęta w krajowej literaturze. Z rys. 14 wynika natomiast, że na 1 bit danych



nawigacyjnych przypada 20460 odcinków kodu P(Y). Jest to zaledwie wycinek o czasie trwania 20 ms z sekwencji kodu P(Y) o okresie jednego tygodnia, zawierającej około  $6,19 \cdot 10^{12}$  odcinków kodu P(Y). Pojedynczy odcinek kodu P(Y) zawiera 154 okresy fali nośnej L1 lub 120 okresów fali nośnej L2. Zmiany fazy fali nośnej sygnałów L1 i L2 o  $180^\circ$  zachodzą w momentach zmiany znaku następujących po sobie odcinków kodu C/A lub P(Y).

### Zależności energetyczne, czyli gdzie jest sygnał GPS

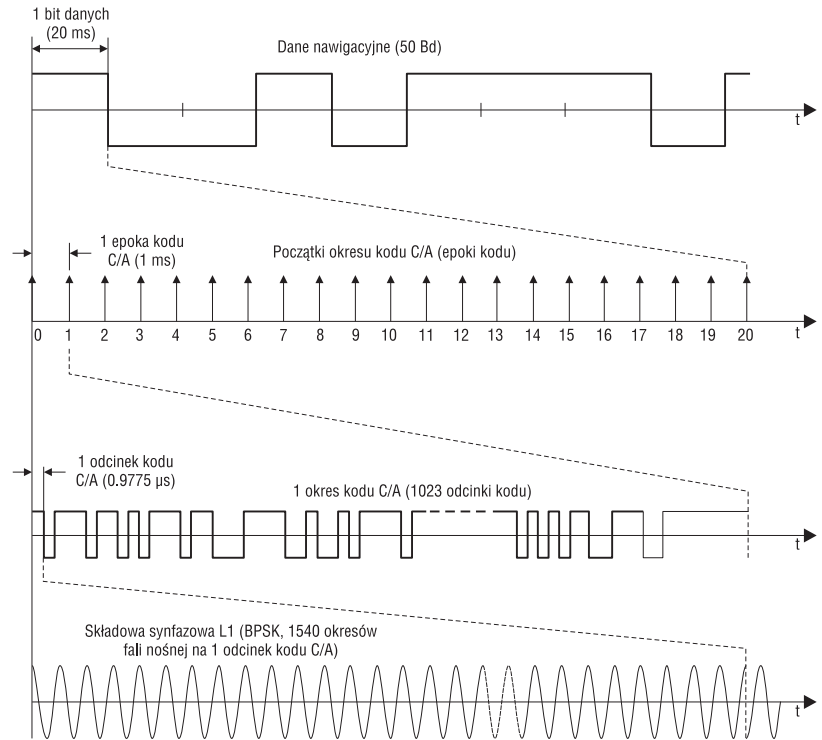
Moc sygnału z kodem C/A, nadawanego z satelity GPS na fali L1 wynosi 21,9 W (13,4 dBW w mierze decybelowej). Antena nadawcza



Rys. 12. Zasada manipulacji fazy BPSK stosowanej w systemie GPS

satelity ma jednak charakterystykę kierunkową i promieniuje w kierunku Ziemi wiązką o szerokości  $42,6^\circ$ , obejmującą z pewnym zapasem kulę ziemską (rys. 15). Powoduje to koncentrację nadawanej mocy w stosunkowo wąskim kącie brylowym i sprawia, że moc sygnału odbieranego wewnątrz wiązki jest taka sama, jak w przypadku, gdyby sygnał pochodził z równoważnego nadajnika emitującego sygnał ze znacznie większą mocą, ale za pośrednictwem anteny dookólnej (izotropowej). Moc takiego równoważnego nadajnika jest określana tzw. efektywną izotropową mocą promieniowaną EIRP (ang. *Effective Isotropic Radiated Power*). Moc EIRP dla sygnału z kodem C/A, nadawanego z satelity GPS na fali L1 wynosi  $478,63 \text{ W}$  ( $26,8 \text{ dBW}$ ).

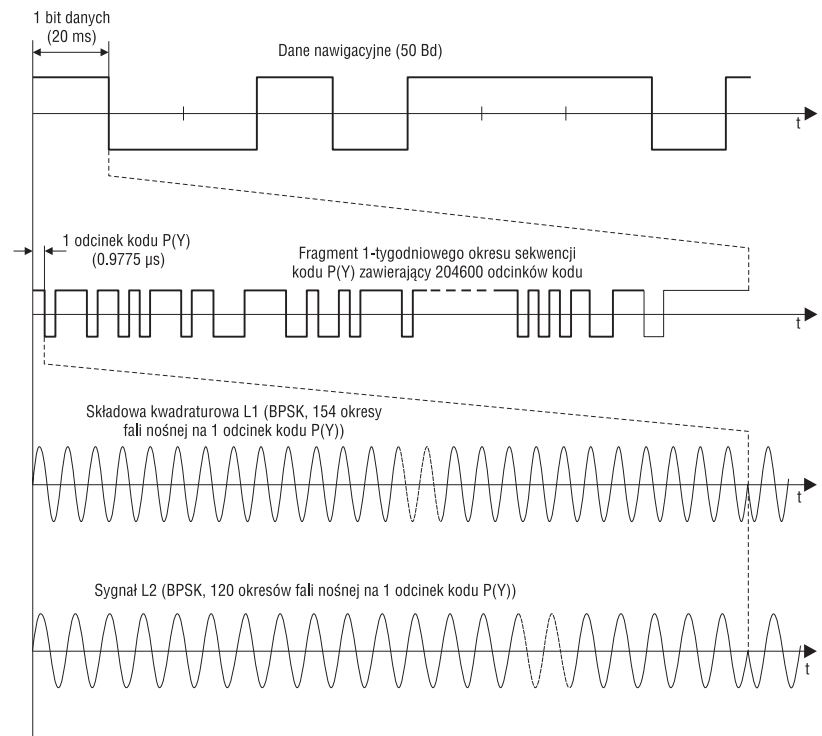
Spróbujmy oszacować, jaka część mocy nadawanego sygnału dociera do segmentu użytkowników GPS. Sygnał propagujący się w kierunku Ziemi rozprasa się wewnątrz kąta brylowego wiązki antenowej i jego gęstość mocy przypadająca na oświetlaną powierzchnię zmniejsza się wraz z odległością od anteny nadawczej. Straty mocy związane z rozpraszaniem sygnału w przestrzeni kosmicznej są opisywane współczynnikiem FSLF (ang. *Free-Space Loss Factor*), który w pobliżu Ziemi dla sygnału L1 wynosi  $-182,4 \text{ dB}$ . Straty mocy w atmosferze opisuje z kolei współczynnik ALF (ang. *Atmospheric Loss Factor*), którego wartość wynosi około  $-2 \text{ dB}$ . Moc sygnału odbieranego przy powierzchni Ziemi można zgrubnie oszacować jako  $EIRP + FSLF + ALF = 26,8 - 182,4 - 2 = -157,6 \text{ dBW}$ . Zgodnie ze specyfikacją systemu, gwarantowana wartość mocy sygnału z kodem C/A na fali L1, na wejściu znajdującego się w pobliżu powierzchni Ziemi odbiornika GPS, wynosi przynajmniej  $-160 \text{ dBW}$ , czyli  $10^{-16} \text{ W}$ . Założono przy tym, że odbiornik jest wyposażony w antenę izotropową o polaryzacji liniowej i wzmacnieniu wynoszącym  $3 \text{ dB}$ . Gwarantowane moce dla pozostałych składowych sygnału GPS są jeszcze mniejsze i wynoszą  $-163 \text{ dBW}$  dla kodu P(Y) na L1 i  $-166 \text{ dBW}$  dla kodu P(Y) na fali L2. Aby zrozumieć jak niewielkie są to moce należy porównać je z poziomem szumów na wejściu odbiornika GPS.



Rys. 13. Zasada wytwarzania składowej synfazowej sygnału L1

Widmo gęstości mocy sygnału z synchroniczną modulacją BPSK jest ciągle i skupione wokół częstotliwości odpowiedniej fali nośnej L1 lub L2. Widmo sygnału L1 jest sumą widma składowej zmodulowanej kodem C/A i kodem P(Y), natomiast widmo sygnału L2 jest widmem sygnału zmodulowanego wy-

łącznie kodem P(Y). Widmo gęstości mocy sygnału z synchroniczną modulacją BPSK ma kształt funkcji  $[\sin(\pi f/f_c)/(\pi f/f_c)]^2$  i maksimum wynoszące  $P_s/f_c$ , przy czym  $P_s$  stanowi minimalną gwarantowaną w specyfikacji wartość mocy odpowiedniej składowej sygnału, zaś  $f_c$  stanowi częstotliwość kodu pseudolosowego



Rys. 14. Zasada wytwarzania sygnału L2 i składowej kwadraturowej sygnału L1

(1,023 MHz dla C/A i 10,23 MHz dla P(Y)). Policzmy teraz wartość maksymalną widmowej gęstości mocy dla składowej sygnału GPS wykorzystywanej w odbiornikach cywilnych, tj. składowej sygnału L1 z kodem C/A. W tym przypadku:

$$P_s = -160 \text{ dBW} = 10^{-16} \text{ W}$$

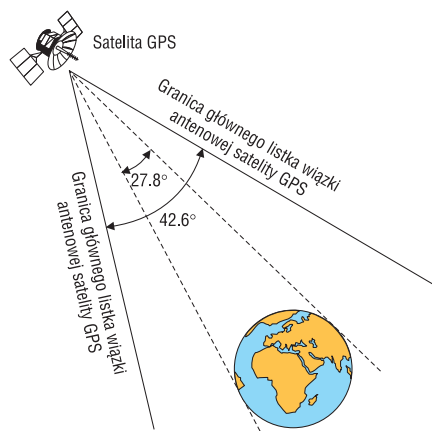
$$f_c = 1,023 \text{ MHz} = 1,023 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$\frac{P_s}{f_c} = \frac{10^{-16} \text{ W}}{1,023 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \approx 0,978 \cdot 10^{-22} \text{ W/Hz}$$

$$\approx -220,1 \text{ dBW/Hz}$$

Widmową gęstość mocy szumów termicznych na wejściu odbiornika GPS można natomiast przyjąć stałą w całym paśmie częstotliwości sygnału GPS, a jej poziom oszacować na około  $-205,2 \text{ dBW/Hz}$ . Oznacza to, że widmowa gęstość mocy sygnału C/A, nawet w swoim maksimum, znajduje się około 14,9 dB poniżej poziomu szumów tła na wejściu odbiornika!

Poziom sygnałów z kodem P(Y) nadawanych na falach L1 i L2 jest jeszcze niższy niż sygnału z kodem C/A. Maksimum widmowej gęstości mocy składowej P(Y) sygnału L1 jest o około 13 dB niższe, a w przypadku sygnału L2 o około 16 dB niższe, niż wartość maksimum obliczona dla kodu C/A. Na **rys. 16** przedstawiono widma gęstości mocy sygnałów L1 i L2 oraz szumu tła na wejściu odbiornika GPS. Maksimum widmowej gęstości mocy sygnału L1 nieco przekracza (o około 0,3 dB) wcześniej wyliczoną dla sygnału z kodem C/A wartość  $-220,1 \text{ dBW/Hz}$ , ponieważ na rysunku przedstawiono sumę sygnałów z kodem C/A i z kodem P(Y). Z przedstawionego rysunku i przeprowadzonych



Rys. 15. Wiązka anteny nadawczej satelity GPS

rozważań wynika, że sygnał GPS w pobliżu Ziemi jest na tyle słaby, że jest całkowicie ukryty w szumie. Obserwacja widma tego sygnału za pomocą analizatora widma nie byłaby zatem możliwa. Powstaje pytanie, jak można odebrać tak słaby sygnał i wydzielić go z szumu. Odpowiedzią na to pytanie jest odbiór korelacyjny, którego istota zostanie opisana w kolejnym artykule.

Dla ścisłości trzeba zaznaczyć, że w praktyce widmo sygnału GPS jest modyfikowane przed nadaniem w wyniku zastosowania filtrów pasmowoprzepustowych nastrojonych na częstotliwości fali nośnej L1 i L2 o szerokości pasma przepustowego wynoszącej około 20 MHz. Oznacza to, że sygnał docierający do odbiornika GPS ma znacznie niższy poziom wstęg bocznych kodu P w widmie niż to przedstawiono na **rys. 16** i zawiera praktycznie tylko wstęgi główne kodu P. Opisana filtracja w niewielkim stopniu ogranicza natomiast widmo składowej sygnału z kodem C/A, ponieważ w paśmie przepustowym filtru mieści się główna wstęga kodu C/A i 9 wstęg bocznych po każdej stronie fali nośnej L1.

## GPS i teoria względności

Ciekawostką techniczną jest fakt, że GPS jest jednym z nielicznych systemów, pomijając akceleratory cząsteczek, w których praktycznego znaczenia nabierają efekty relatywistyczne opisywane przez szczególną i ogólną teorię względności Einsteina. Jeden z efektów relatywistycznych polega na zwolnieniu biegu zegara znajdującego się w ruchu w porównaniu z zegarem znajdującym się w spoczynku (tzw. dylatacja czasu). Satelity systemu GPS poruszają się ze stosunkowo dużą prędkością, wynoszącą około 4 km/s, a zatem efekt dylatacji czasu powoduje „późnienie” się zegarów atomowych na satelitach o około 7  $\mu\text{s}$  na dobę. Jednocześnie występuje jednak drugi efekt relatywistyczny, polegający na przyspieszeniu biegu zegara znajdującego się w słabszym polu grawitacyjnym. Zmniejszenie natężenia pola grawitacyjnego oddziałującego na znajdujące się na wysokich orbitach zegary satelitów GPS, w stosunku do pola grawitacyjnego działającego na zegary na Ziemi, powoduje „spieszenie” się zegarów atomowych o około 45  $\mu\text{s}$  na dobę. Łącznie oba te efekty powo-

wałyby przyspieszenie biegu zegarów na satelitach o około 38  $\mu\text{s}$  na dobę, co już po kilku minutach uniemożliwiłoby korzystanie z systemu, a po każdej upływającej dobie zwiększałoby błąd obliczania odległości satelita – odbiornik o ponad 10 km. Efekty relatywistyczne są w systemie NAVSTAR GPS kompensowane między innymi przez zmniejszenie częstotliwości zegara przed wystrzeżeniem satelity o 4,57 mHz do wartości 10,299999995453 MHz, dzięki czemu z punktu widzenia użytkownika znajdującego się w pobliżu Ziemi, jest ona bliska częstotliwości pożądanej 10,23 MHz.

## Dlaczego sygnał GPS jest taki skomplikowany?

Z przedstawionego opisu budowy systemu NAVSTAR GPS i opisu sygnałów nadawanych z jego satelitów wynika, że jest to system bardzo skomplikowany, a stosowane w nim rozwiązania łączą zaawansowaną wiedzę i osiągnięcia technologiczne nie tylko z dziedziny elektroniki. Trzeba przy tym przyznać, że w artykule pominięto szereg ważnych aspektów działania GPS, których opis nie jest jednak niezbędny do zrozumienia istoty jego działania. Można zadać sobie pytanie, dlaczego system GPS jest aż tak skomplikowany. Odpowiedź na to pytanie tkwi w założeniach przyjętych przez konstruktorów systemu. Najważniejsze z tych założeń oraz wynikające z nich rozwiązania techniczne zastosowane w systemie NAVSTAR GPS zestawiono poniżej:

1. Przyjęte wymaganie na równoczesną obsługę dowolnej liczby użytkowników doprowadziło do skonstruowania systemu, w którym urządzenia użytkowników są tylko odbiornikami – nie nadają sygnałów zwrotnych do satelitów. Spowodowało to konieczność nadawania z satelitów danych orbitalnych i kodów pseudolosowych oraz konieczność zapewnienia bardzo precyzyjnej skali czasu dla sygnałów GPS.
2. Założenie o równoczesnym przeznaczeniu wojskowym i cywilnym systemu zostało zrealizowane przez równoczesne nadawanie różnych kodów pseudolosowych C/A i P. Planowane dodawanie do już istniejących sygnałów nowych sygnałów cywilnych na L2

i L5 oraz nowych sygnałów wojskowych z kodem M na L1 i L2 zwiększy dodatkowo możliwości, ale też i stopień komplikacji systemu GPS.

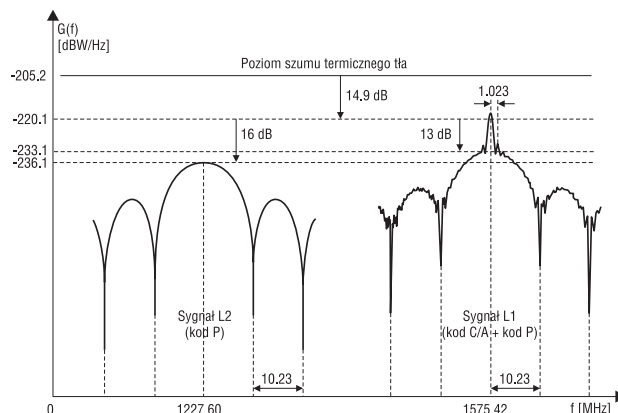
3. Konieczność zapewnienia wysokiej dokładności pozycjonowania doprowadziła do nadawania sygnałów na dwóch częstotliwościach nośnych, dzięki czemu użytkownicy wojskowi mają możliwość korekcji błędów jonosferycznych. W niedalekiej przyszłości taką możliwość uzyskają również cywilni użytkownicy GPS.
4. Konieczność identyfikacji sygnałów różnych satelitów nadających na tych samych częstotliwościach spowodowała zastosowanie unikatowych kodów pseudolosowych nadawanych przez poszczególne satelity, czyli zwielokrotnianie kanału z podziałem kodowym CDM.
5. Występowanie różnorodnych zjawisk fizycznych związanych z ruchem i położeniem satelitów (m.in. zjawiska relatywistyczne) oraz zjawisk związanych z propagacją sygnału przez różne warstwy atmosfery spowodowała konieczność transmisji w depeшы nawigacyjnej szeregu danych, których odbiór i wykorzystanie w odbiornikach GPS jest niezbędny dla zapewnienia dobrej dokładności obliczanej położenia, prędkości i czasu.
6. Zwiększenie odporności na przy-

padkowe i celowe zakłócenia sygnałów zostało częściowo zrealizowane dzięki zastosowaniu szerokopasmowej modulacji DS, w której stosuje się rozpraszanie widma wąskopasmowego sygnału modulującego za pomocą szybkozmiennego kodu pseudolosowego o szerokim paśmie.

#### 7. Uniemożliwienie

„podszycania” się pod nadajnik sygnału GPS i wprowadzania w błąd wojskowych użytkowników GPS zostało osiągnięte przez zastosowanie A-S, tzn. szyfrowania kodu P do postaci kodu Y.

Na szczęście elektronik wykorzystujący w swoich projektach odbiorniki GPS nie musi szczegółowo orientować się we wszystkich zagadnieniach poruszanych w tym artykule. Ogólna wiedza o budowie i organizacji systemu oraz sygnałach nadawanych z satelitów znacząco ułatwi jednak właściwe stosowanie odbiorników. Należy zdawać sobie sprawę, że w większości urządzeń, zwłaszcza amatorskich, stosowane są obecnie jednoczęstotliwościowe odbiorniki GPS, odbierają-



Rys. 16. Widmo gęstości mocy sygnału GPS (bez uwzględnienia filtracji w nadajniku)

ce wyłącznie sygnał L1. Pomimo, że sygnał ten zawiera zarówno składową zmodulowaną kodem C/A jak i P(Y), demodulowana jest tylko składowa z kodem C/A, przez co użytkownik ma dostęp do standardowej usługi pozycjonowania SPS i nie ma możliwości korekcji błędów jonosferycznych. W kolejnym artykule zostanie omówiony sposób, w jaki, na podstawie sygnałów odbieranych z satelitów w odbiorniku GPS, jest wyznaczane położenie użytkownika. Rozważania zostaną przy tym ograniczone do praktycznie stosowanych obecnie jednoczęstotliwościowych odbiorników cywilnych, odbierających składową sygnału L1 z kodem C/A.

**Piotr Kaniewski**  
pkaniewski@wat.edu.pl

## Wstęp do Klubu AVT

**AUDIO**

**Elektronik**  
MAGAZYN ELEKTRONIKI PROFESJONALNEJ

**Gitarzysta**  
MAGAZYN FANÓW GITARY

**świat radio**  
Świat radiotelefonii CB i telekomunikacja  
MAGAZYN WSZYSTKICH UŻYTKOWNIKÓW ETTERU

budujemy  
**Dom**

**ELEKTRONIKA**  
PRAKTYCZNA

INTERNET  
**maker**

**ELEKTRONIKA**  
dla wszystkich

**ESTRADA**  
**STUDIO**

**młody technik**

**magazyn INTERNET**

**Prenumerujesz więcej niż jedno z powyższych pism?**

To znaczy, że jesteś już Członkiem Klubu AVT uprawnionym do comiesięcznego zamawiania bezpłatnych egzemplarzy naszych czasopism, wydanych przed 2 miesiącami.

Jeśli prenumerujesz  $n$  czasopism, możesz zamówić  $n-1$  darmowych egzemplarzy

(np. Prenumerator 2 tytułów może otrzymać za darmo 1 egzemplarz, zaś Prenumerator 6 tytułów ma prawo do 5 darmowych egzemplarzy).

Prezentacje aktualnie oferowanych numerów wszystkich czasopism znajdziesz na stronach

**www.Klub.AVT.pl**. Tam również możesz złożyć bezpłatne zamówienie.

**Jeszcze nie prenumerujesz?**

Zaprenumeruj! Zajrzyj na str. 133 lub skontaktuj się z Działem Prenumeraty: tel. 022 5689922, e-mail prenumerata@avt.pl