



# CIRCUITE DE TELECOMUNICAȚII

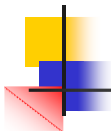
## Lectura I

### Modularea și Demodularea – o trecere în revistă

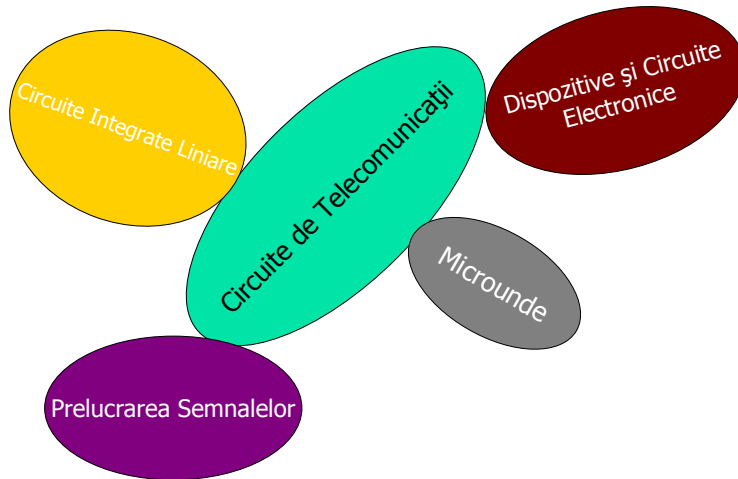
Prof. dr. ing. Andrei Câmpeanu  
Departamentul Comunicații, A310-311  
Email: [andrei.campeanu@etc.utt.ro](mailto:andrei.campeanu@etc.utt.ro)

A. Campeanu U.P.T.

1



### Conexiuni cu alte domenii importante de studiu



A. Campeanu U.P.T.

2

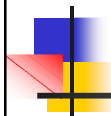


## Tehnici de Modulație

- Modulații de amplitudine
  - Modulația standard (MA-P + 2BL)
  - Modulația de produs (MA-PS sau MA-2BL)
  - Modulația cu bandă laterală unică (MA-BLU)
  - Modulația de amplitudine în cuadratură (QAM)
- Modulații cu anvelopă constantă
  - Modulația de fază (PM)
  - Modulația de frecvență (FM)
- Tehnici de acces multiplu
  - FDMA
  - TDMA
  - CDMA
- Tehnici de bandă largă (UWB)
  - Modulația de impuls
  - OFDM

A. Campeanu U.P.T.

3

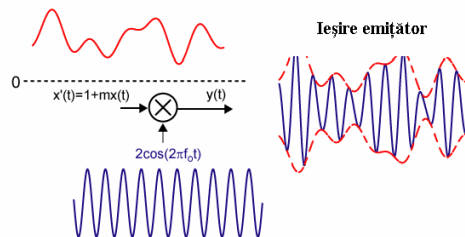


## Modulația de amplitudine

A. Campeanu U.P.T.

4

## Modulația de amplitudine standard (Emitător)

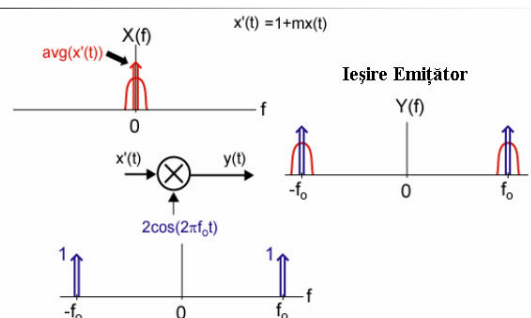


- Variația amplitudinii purtătoarei sinusoidale se face conform semnalului modulator din banda de bază  $x'(t)$ .
- Componenta de cc a semnalului modulator influențează semnalul transmis și funcționarea receptorului. Valoarea acesteia este mai mare decât amplitudinea semnalului util.
  - Permite utilizarea unui detector simplu de anvelopă.
  - Se transmite inutil putere importantă pe frecvența purtătoarei.

A. Campeanu U.P.T.

5

## Reprezentare în frecvență a ieșirii emițătorului MA standard

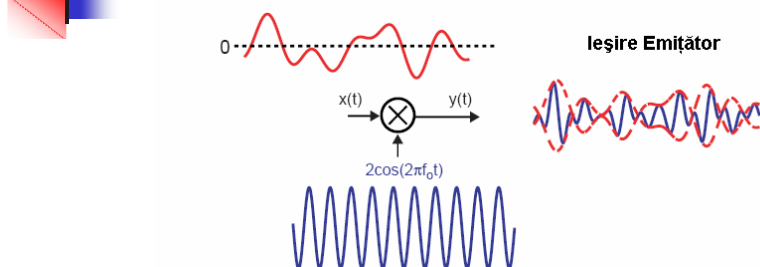


- Semnalul modulator  $x'(t)$  are o componentă importantă de cc nenulă.
- Consecința este impulsul Dirac la frecvența zero din spectru.
  - Semnalul emis are un impuls în spectru la frecvența purtătoarei
  - Această componentă, fixă în fază și frecvență, nu poartă informație și reprezintă în consecință o pierdere de putere transmisă.

A. Campeanu U.P.T.

6

## Modulația de amplitudine cu purtătoarea suprimată MA-PS (sau cu 2 benzi laterale – 2BL)

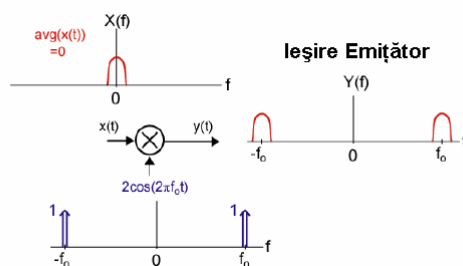


- Anvelopa semnalului sinusoidal modulat nu mai corespunde direct semnalului modulator.
  - Ea urmărește, în schimb, valoarea absolută a semnalului din banda de bază iar valorile negative ale acestuia determină o defazare de  $180^\circ$  a purtătoarei.
  - La recepție nu mai poate fi utilizat *detectorul de anvelopă*.
- Este înlăturată componenta pe frecvența purtătoarei, care nu conține informație: în consecință, este necesară mai puțină putere la transmisie pentru același raport semnal/zgomot (SNR) decât în cazul modulației MA-P+2BL.

A. Campeanu U.P.T.

7

## Spectrul MA-PS

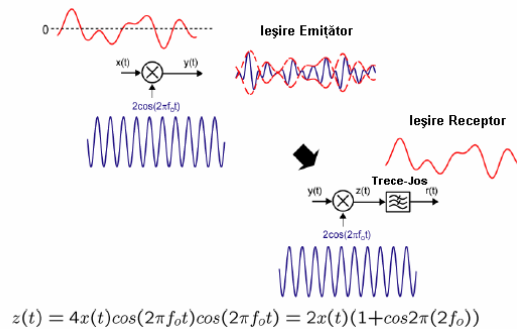


- A dispărut impulsul Dirac din porțiunea de cc a spectrului semnalului din banda de bază.
  - Spectrul ieșirii emițătorului nu mai conține impulsul pe frecvența purtătoarei: crește mult eficiența în putere a acestuia.

A. Campeanu U.P.T.

8

## Recepția MA-PS (detectie coerentă)

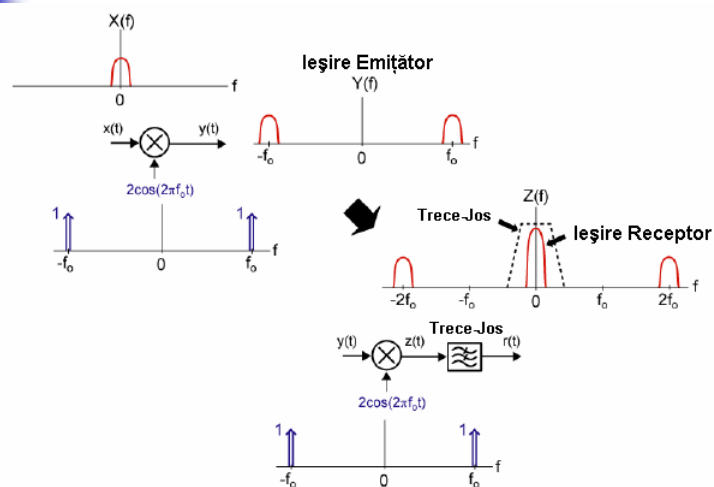


- Funcționează corect, indiferent de nivelul de cc a semnalului din banda de bază.
- Necesită la receptor un *Oscilator Local* (LO) sincronizat (aliniat) precis în fază și frecvență cu purtătoarea.

A. Campeanu U.P.T.

9

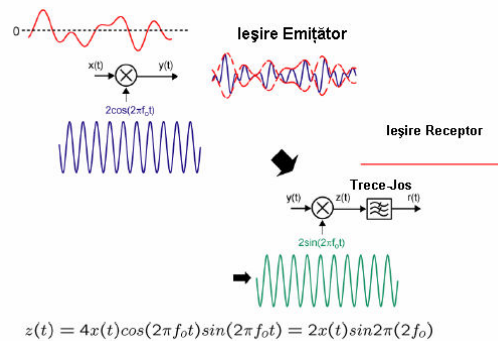
## Reprezentare în domeniul frecvență a acțiunii receptorului MA-PS (detector coerent)



A. Campeanu U.P.T.

10

## Efectul deza­linierii oscilatorului local (LO) al receptorului

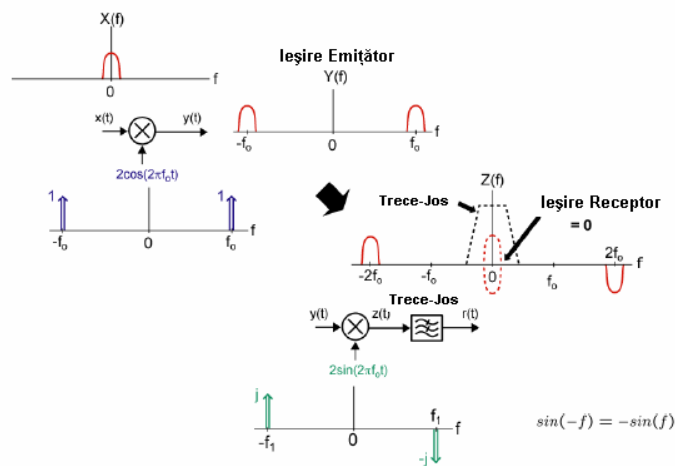


- Cazul cel mai defavorabil este atunci când oscilatorul local și purtătoarea semnalului modulat sunt defazate cu 90° una față de cealaltă.
  - În acest caz, ieșirea detectorului coerent este nulă.

A. Campeanu U.P.T.

11

## Efectul deza­linierii cu 90° a oscilatorului local (LO) – Reprezentare în domeniul frecvență



A. Campeanu U.P.T.

12

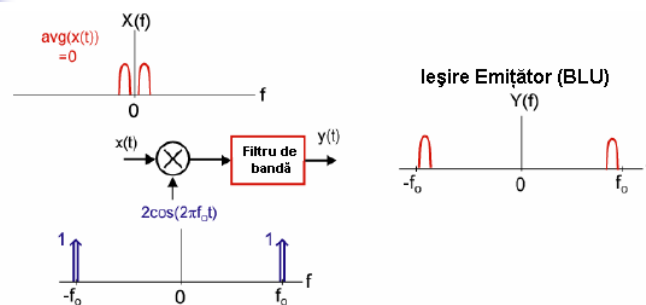
## Modulația de amplitudine cu bandă laterală unică (MA-BLU)

- Banda laterală superioară (BLS) și Banda laterală inferioară (BLI) sunt simetrice, astfel ele transportă aceeași informație.
- Modulația MA standard nu este eficientă nici din punctul de vedere al puterii și nici din cel al benzii de frecvență ocupate.
- Modulația MA-PS (de produs) îmbunătățește eficiența din punctul de vedere al puterii dar continuă să utilizeze o bandă de frecvențe dublă decât este necesar.
- Multe semnale din banda de bază nu au nici componentă de cc și nici componente de foarte joasă frecvență.
- Una dintre benzile laterale ale semnalului MA-PS poate fi înlăturată fie de un etaj de filtrare IF (*Frecvență Intermediară*) fie de un etaj de filtrare RF (în *RadioFrecvență*), mai ușor se face filtrarea cu un etaj IF.

A. Campeanu U.P.T.

13

## Spectrul semnalului MA-BLU

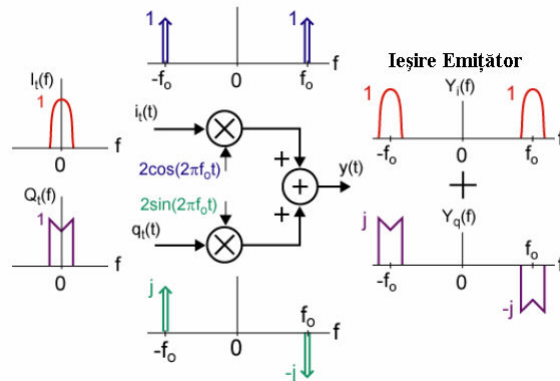


- Una dintre cele două benzi laterale sunt eliminate de către un filtru trece-bandă sau prin tehnici de defazare.
- Banda ocupată de semnalul MA-BLU este redusă de 2 ori în raport cu semnalul MA-PS: este, drept urmare, o modulație mai eficientă din punctul de vedere al benzii de frecvențe.

A. Campeanu U.P.T.

14

## Modulația de amplitudine în cuadratură (QAM)

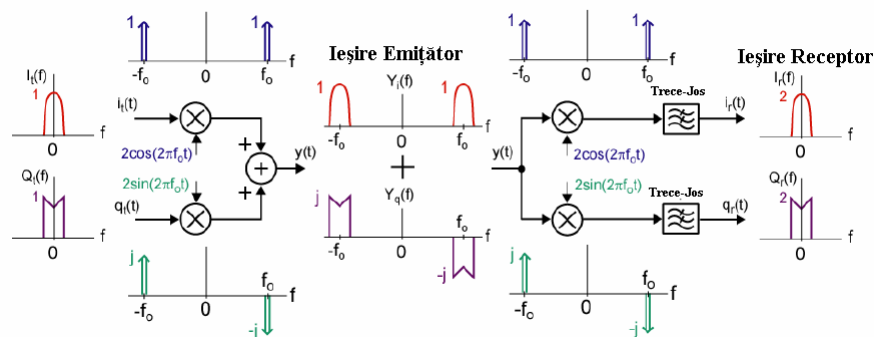


- Se bazează pe sensibilitatea recepției coerente față de alinierea în fază cu oscilatorul local al emițătorului.
  - Sunt disponibile două canale de transmisie ortogonale (I și Q).
  - Se transmit de către emițător două semnale în banda de bază (I și Q) pe două purtătoare sinusoidale de aceeași frecvență aflate în cuadratură.

A. Campeanu U.P.T.

15

## Recepția semnalelor QAM



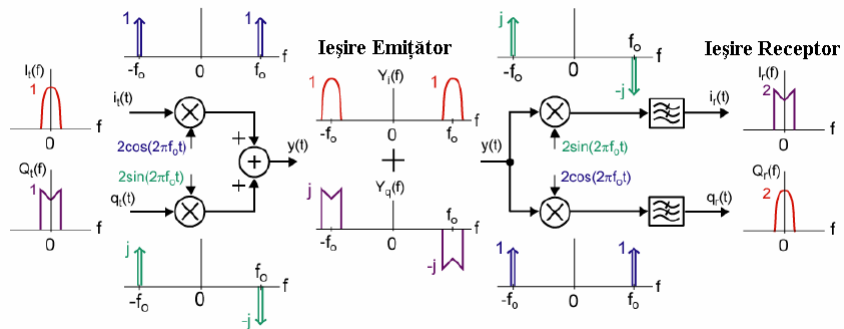
- Receptorul utilizează pentru demodulare două sinusoide în cuadratură
  - Receptorul trebuie să alinieze în fază și frecvență semnalele oscilatorului său local (LO) cu cele ale oscilatorului local de la emițător.
  - O aliniere exactă permite recuperarea corectă a semnalelor I și Q după cum se vede în figură.

A. Campeanu U.P.T.

16



## Efectul dezalinierii de 90° la recepția modulației QAM

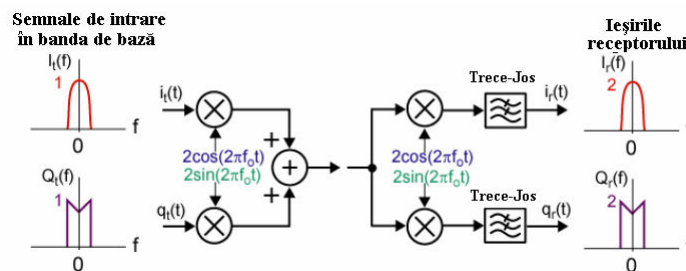


- La ieșirea receptorului, canalele I și Q sunt inversate între ele, dacă oscilatorul local al acestuia este defazat cu 90° față de emițător.
  - Cu toate acestea, niciun fel de informație nu se pierde.
  - Se poate utiliza procesarea semnalului în banda de bază pentru a extrage semnalele I/Q în ciuda defazăzării dintre emițător și receptor.

A. Campeanu U.P.T.

17

## Particularități ale detecției coerente a modulației QAM

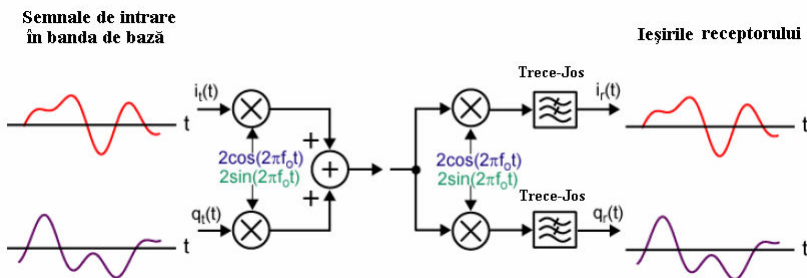


- Pentru cele ce urmează, vom presupune că:
  - Emițătorul și receptorul sunt aliniate în fază.
  - Filtrele trece-jos de la recepție sunt ideale.
  - Semnalele I/Q de la emisie și recepție sunt aceleași, cu excepția unui factor de scală.
- În realitate,
  - Canalul de transmisie adaugă zgomot și provoacă distorsiuni.
  - Se utilizează prelucrarea DSP a semnalelor în banda de bază pentru corectarea problemelor.

A. Campeanu U.P.T.

18

## Aplicații ale modulației analogice în cuadratură - QAM

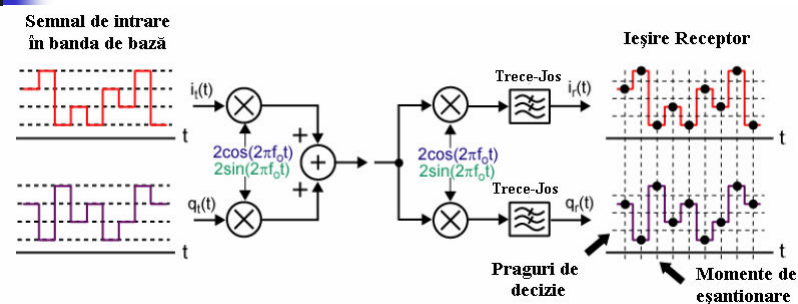


- Semnalele I/Q sunt semnale analogice în timp continuu (după cum se vede în figură).
- S-a utilizat în radio-comunicațiile AM/FM, televiziune analogică și la prima generație de telefonie celulară.
- Sistemele mai noi folosesc în locul modulației QAM mai degrabă modulația digitală.

A. Campeanu U.P.T.

19

## Modulația digitală în cuadratură - QAM



- Semnalele I/Q iau valori discrete la momente de timp discrete, corespunzând unor date digitale.
  - Receptorul eșantionează canalele I/Q.
  - Se utilizează pragurile de decizie pentru a evalua valoarea datelor la fiecare moment de timp.
- Semnalele I/Q pot fi binare sau multi-bit.
  - În figură este reprezentat un semnal multi-bit.

A. Campeanu U.P.T.

20



## Avantajele modulației digitale QAM

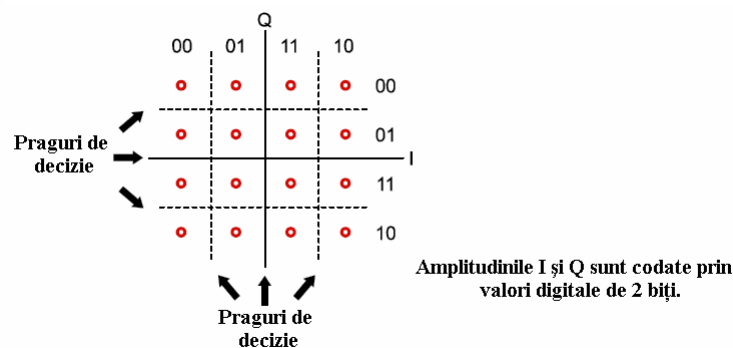
- Permite transmiterea informației digitale în "pachete".
  - Informația poate fi comprimată în timp și trimisă eficient în pachete prin rețea.
  - Prin contrast, modulația analogică necesită conexiuni care să fie permanent disponibile.
  - Utilizare ineficientă a canalului radio dacă există "timpuri morți" în fluxul de informație.
- Permite realizarea corecției erorilor.
  - O sensibilitate mai mică la imperfecțiunile canalului radio.
- Permite compresia informației.
  - Utilizare mai eficientă a canalului.
- Suportă o varietate mare relativ la conținutul informației.
  - Voce, text și mesaje email, video toate pot fi reprezentate prin secvențe digitale de biți.

A. Campeanu U.P.T.

21



## Constelația de valori I/Q a modulației digitale în cuadratură multi-bit (exemplu di-bit)

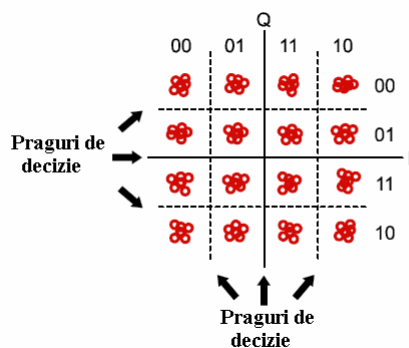


- Se pot observa valorile I/Q la momentele de eșantionare într-un sistem bidimensional de coordonate.
- Pragurile de decizie marchează regiunile care corespund diferitelor valori de date.
- Se utilizează codul Gray pentru a minimiza numărul de erori de bit care se produc atunci când zgomotul determină decizii greșite.

A. Campeanu U.P.T.

22

## Impactul zgomotului asupra constelației I/Q în cazul modulației digitale în cuadratură



- Valorile eșantionate ale datelor recepționate nu se mai regăsesc de fiecare dată în aceeași poziție la momentele de eșantionare.
- Pragurile de decizie rămân fixate.
- Zgomotul semnificativ provoacă erori în biții recepționați (Raportul semnal/zgomot determină numărul maxim de biți).

A. Campeanu U.P.T.

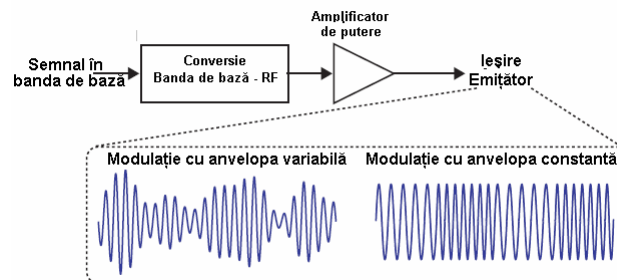
23

## Modulații cu anvelopă constantă

A. Campeanu U.P.T.

24

## Problema eficienței energetice la emițător

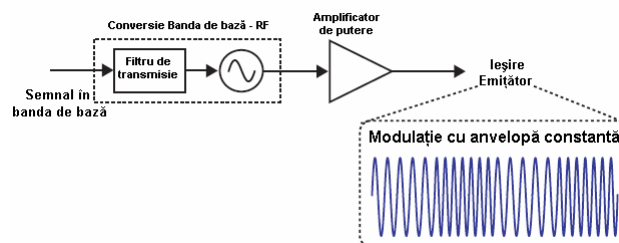


- Amplificatorul de putere domină consumul energetic în cele mai multe sisteme de comunicații.
  - Amplificatoarele de putere lineare consumă mai multă putere decât cele nelineare.
- Modulația cu anvelopă constantă permite utilizarea amplificatoarelor de putere nelineare.
  - Consum redus de energie

A. Campeanu U.P.T.

25

## Prezentare simplificată a modulației cu anvelopă constantă



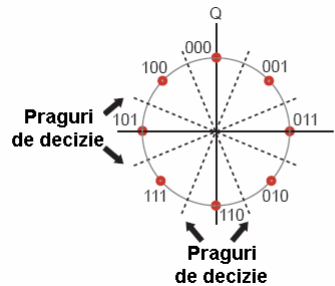
- Doar metodele de modulație de fază și frecvență dau modulație de anvelopă constantă.
- Atât modulația de fază cât și cea de frecvență pot fi obținute cu *Oscilatoare Controlate în Tensiune* (VCO) ideale.
  - VCO ideal este utilizat drept model în scop de analiză.
  - De observat că modulația de fază este aproape imposibil de realizat cu VCO practice.

A. Campeanu U.P.T.

26



## Exemplu de constelație I/Q pentru modulație de fază digitală



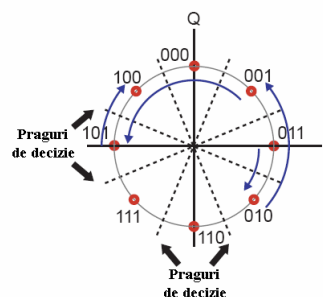
- Semnalele I/Q se combină întotdeauna în așa fel încât amplitudinea să rămână constantă.
  - Constelația de puncte formează un cerc în planul I/Q.
  - Pragurile de decizie separă diferite regiuni de fază.

A. Campeanu U.P.T.

27



## Tranziția între punctele constelației I/Q



- Condiția de anvelopă constantă forțează tranzițiile să aibă loc de-a lungul cercului pe care se situează punctele constelației.
  - Filtrarea canalelor I/Q nu poate fi făcută independent.
  - În consecință, există un impact important asupra spectrului de la ieșirea emițătorului.

A. Campeanu U.P.T.

28



## Tehnici de acces multiplu

---

A. Campeanu U.P.T.

29



## Ce determină adoptarea tehnicilor de acces multiplu

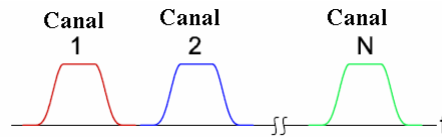
---

- Se dorește realizarea simultană a comunicației între mai mulți utilizatori diferiți pe un unic canal fizic.
- Spațiul fizic liber trebuie să reprezinte o resursă partajată.
  - El trebuie să fie partajat între mai mulți utilizatori.
  - El poate fi partajat atât în timp sau frecvență cât și prin "codare ortogonală" (sau aproape ortogonală) a semnalelor de date.

A. Campeanu U.P.T.

30

## Tehnica de acces multiplu cu divizare în frecvență (FDMA)

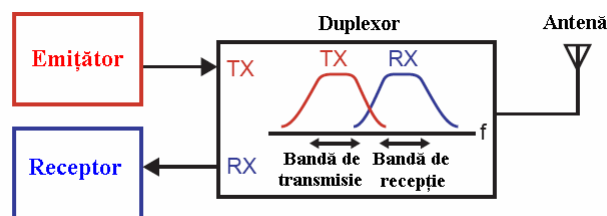


- Plasează utilizatorii pe canale diferite de frecvență.
- Există două metode distincte de a rezolva emisia/recepția pentru un utilizator dat.
  - Duplexare cu divizare în frecvență.
  - Duplexare cu divizare în timp.

A. Campeanu U.P.T.

31

## Duplexorul cu divizare în frecvență (Full-duplex)



- Separă canalele de frecvență în benzi de transmisie și de recepție.
- Permite transmisia și recepția simultană.
  - Izolarea dintre receptor și emițător este realizată de către duplexor.
  - Nu permite comunicarea directă dintre utilizatori, ci doar dintre stație periferică și stația de bază.
- Avantaj: izolează utilizatorii.
- Dejavantaje:
  - Duplexorul are atenuarea de inserție mare (adică atenuează semnalele ce trec prin el).
  - Utilizează o bandă de frecvențe dublă.

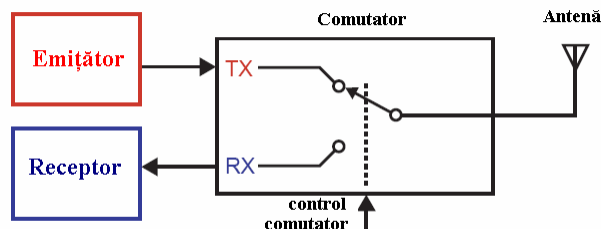
A. Campeanu U.P.T.

32





## Duplexorul cu divizare în timp (semi-duplexorul)



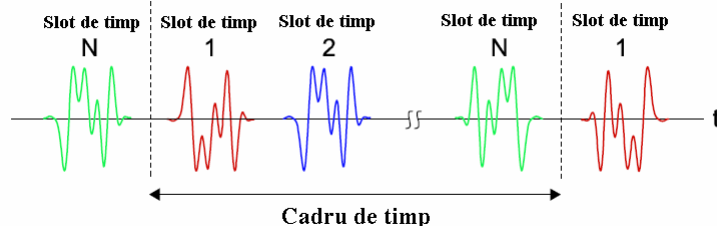
- Utilizează orice canal dorit de frecvență atât pentru emisie cât și pentru recepție.
- Emite și recepționează semnalele la momente de timp distincte.
- Permite comunicarea directă dintre utilizatori (chiar dacă nu este neapărat necesară).
- Avantaj: comutatorul are atenuarea de inserție redusă față de duplexor.
- Dezavantaj: receptorul este mult mai sensibil la semnalele transmise de ceilalți utilizatori.

A. Campeanu U.P.T.

33



## Tehnica de acces multiplu cu divizare în timp (TDMA)

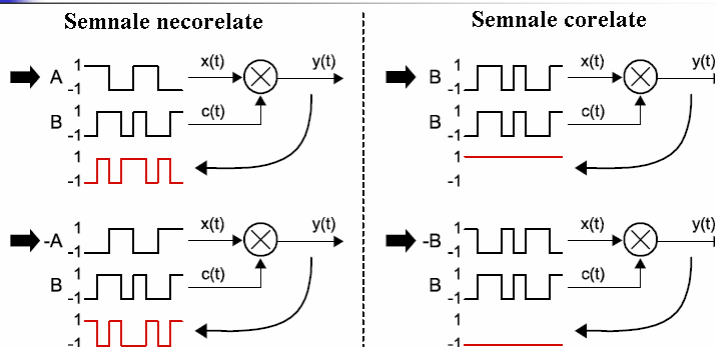


- Utilizatorii sunt plasați în sloturi de timp diferite.
  - Un slot de timp se repetă cu perioada cadrului de timp.
- TDMA este adesea combinat cu multiplexarea în frecvență (FDMA).
  - Permite ca mai mulți utilizatori să ocupe același canal de frecvență.

A. Campeanu U.P.T.

34

## Separarea canalelor prin utilizarea "codării cvasi-ortogonale"

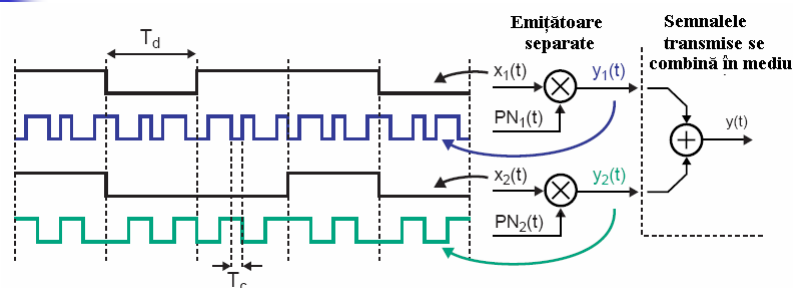


- Să considerăm cele două cazuri de corelație:
  - Două secvențe aleatoare Bernoulli independente.
    - Rezultatul este o secvență aleatoare Bernoulli.
  - Aceiași secvență Bernoulli.
    - Rezultatul este 1 sau -1, în funcție de polaritatea relativă a celor două secvențe.

A. Campeanu U.P.T.

35

## Tehnica de acces multiplu CDMA

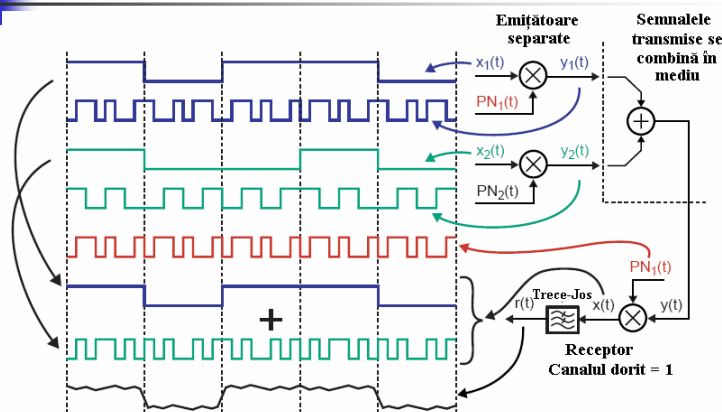


- Se atribuie câte o secvență de cod unică fiecărui emițător.
- Valorile de date sunt codate în secvența de ieșire a emițătorului prin modificarea polarității secvenței de cod transmise.
  - Fiecare impuls în secvența de date are perioada  $T_d$ .
- Impulsurile individuale reprezintă valori de date binare.
  - Fiecare impuls din secvența de cod are perioada  $T_c$ .
- Impulsurile individuale sunt denumite "chips".

A. Campeanu U.P.T.

36

## Receptorul selectează emițătorul în conformitate cu codul acestuia

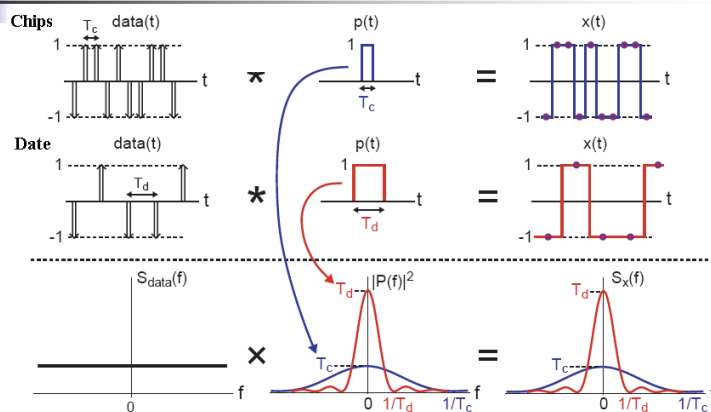


- Receptorul corelează semnalul de la intrare cu codul emițătorului dorit.
  - Informația de la emițătorul dorit este refăcută.
  - Informația de la alte emițătoare rămâne randomizată.

A. Campeanu U.P.T.

37

## Analiza în frecvență a modulației CDMA

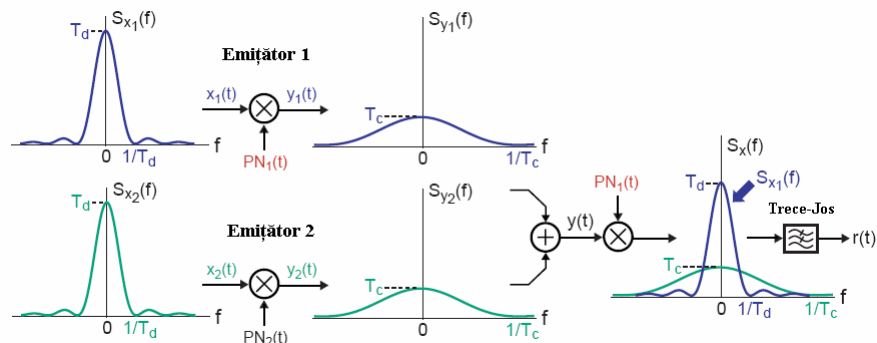


- Secvențele de date și chipsuri operează pe scări de timp diferite.
  - Spectrele asociate au lărgimi și amplitudini diferite.

A. Campeanu U.P.T.

38

## Analiza în frecvență a modulației CDMA (continuare)



- Emițătoarele CDMA "lărgesc" spectrul de date prin codarea acestora în secvențe de chipsuri.
- Receptorul CDMA se corelează cu codul emițătorului dorit.
  - Spectrul canalului dorit revine la lărgimea sa originală.
  - Spectrul canalului nedorit rămâne larg.
    - Poate fi eliminat în principal prin filtrare trece-jos.

A. Campeanu U.P.T.

39