



Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та IoT
ФАЕТ



Електронні системи
Electronic Systems

Тема 5
Lecture #6

Яновський, Фелікс Йосипович
професор, доктор технічних наук,
лауреат Державної премії України, IEEE Fellow
Професор кафедри електроніки НАУ

Орієнтовний тематичний план лекцій

Основи теорії систем, сигнали і первинні перетворювачі електронних систем

1. Вступ. Визначення і термінологія, класифікація	2
2. Характеристики електронних систем	2
3. Теорія систем, аналіз електронних систем	2
4. Первинні перетворювачі електронних систем	4
5. Сигнали електронних систем	2
6. Компоненти і обробка сигналів в ЕС	1
7. Експлуатаційні характеристики електронних систем	2
8. Технічні характеристики електронних систем	2
9. Технічна реалізація системи	1
10. Електронні системи мобільного зв'язку	6
11. Електронні системи локації	18
12. Електронні системи авіоніки	20
Всього годин	64

Сигнали електронних систем
Electronic System Signals

Сигнали в електронних системах керування.
Зондувальні сигнали активних електронних систем.
Signals in electronic control systems.
Sounding waveforms of active electronic systems

Сигнали в електронних системах

- На початковій стадії розвитку, електронні пристрої і системи виконували функції вимірювання і реєстрації результатів.
- З удосконаленням елементної бази і підвищення її надійності область застосування стала включати в себе автоматизовані (за участю людини) і повністю автоматичні керуючі системи. Одне з перших і найважливіших завдань управління – регулювання стану об'єктів.
- Регулювання включає в себе послідовність операцій, основними з яких є:
 - отримання відомостей про стан об'єкта або процесу (вимірювання);
 - отримання ззовні командних впливів, що визначають необхідний стан об'єкта або процесу (задавальна дія, задавальний вплив – задаючеє воздействие [рос.]);
 - обробка отриманих сигналів з метою визначення найбільш ефективного управлінського впливу;
 - формування керуючих впливів, які за допомогою виконавчих органів (актуаторів) змінюють стан об'єкта.

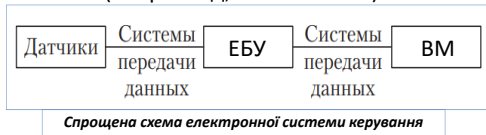
Сигнали в електронних системах

- За останні роки способи управління, апаратура і підхід розробника до створення автоматичних систем управління істотно змінилися. Це пов'язано з цифровим представленням інформації та програмною реалізацією алгоритмів.
- З погляду на техніку, це стало можливим завдяки інтенсивному розвитку мікроелектроніки, що призвело до збільшення кількості електронних компонентів на одиницю площі кристала; що, в свою чергу, дозволило розмістити обчислювач плюс контролер на одному кристалі напівпровідника, розміщеного в єдиному корпусі.
- Така інтегральна схема власне і є мікропроцесором.

Основні зміни в проектуванні електронних систем
полягають у наступному:

- ✓ найбільш суттєві операції над сигналами виконуються після представлення їх у формі двійкових багаторозрядних чисел;
- ✓ замість лінійних перетворень над аналоговими (неперервними в часі) сигналами стали використовуватися кінцево-різніцеві перетворення (цифрове управління);
- ✓ відбулася централізація функцій: замість декількох керуючих пристроїв для складного об'єкта може використовуватися один процесор, який по черзі виконує їх функції в режимі поділу часу;
- ✓ внаслідок цього посилюється увага до алгоритмічного боку управління (тобто до написання ефективного і надійного програмного забезпечення);
- ✓ посилення уваги до створення вбудованих засобів самодіагностики пристроїв.

Електронні системи управління (наприклад, автомобілем)



- Спрощений розгляд електронної системи управління об'єктом дозволяє виділити чотири основні типи блоків:
 - датчики (джерела вхідних сигналів),
 - системи передачі даних,
 - електронний блок (блоки) управління (ЕБУ),
 - виконавчі механізми (ВМ).

Класифікація сигналів

За ознакою фізичної природи носія інформації:

- електричні;
- електромагнітні;
- оптичні;
- акустичні;
- та інші.

Класифікація сигналів

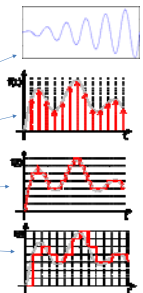
За способом задавання сигналу :

- регулярні (детерміновані), задані аналітичної функцією;
- нерегулярні (випадкові), які беруть довільні значення в будь-який момент часу. Для опису таких сигналів використовується апарат теорії ймовірностей.

Класифікація сигналів

Залежно від функції, яка описує параметри сигналу, виділяють аналогові, дискретні, квантовані і цифрові сигнали :

- неперервні (аналогові), описувані неперервною функцією;
- дискретні, описувані функцією відліків, взятих в певні моменти часу;
- квантовані за рівнем;
- дискретні сигнали, квантовані за рівнем (цифрові).



Подання сигналу і спектр

- Є два способи подання сигналу в залежності від області визначення: часовий і частотний. У першому випадку сигнал представляється функцією часу.
- Крім звичного часового подання сигналів і функцій при аналізі та обробці даних широко використовується опис сигналів функціями частоти. Дійсно, будь-який як завгодно складний за своєю формою сигнал можна представити у вигляді суми більш простих сигналів, і, зокрема, у вигляді суми найпростіших гармонійних коливань, сукупність яких називається частотним спектром сигналу.
- Для переходу до частотного способу представлення використовується перетворення Фур'є

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$$
- Комплексна функція $S(\omega)$ називається спектр. функцією або спектр. щільністю.
 - $|S(\omega)|$ - спектр амплітуд;
 - $\phi(\omega) = \arg(S(\omega))$ - спектр фаз.

Фізичний сенс спектральної функції

- Сигнал $s(t)$ подається у вигляді суми нескінченного ряду гармонійних складових (синусоїд) з амплітудами $\frac{|S(\omega)|}{\pi} d\omega$, що неперервно заповнюють інтервал частот від 0 до ∞ , і початковими фазами $\phi(\omega)$.
- Розмірність спектральної функції є розмірність сигналу, помножена на час.

Параметри сигналів

- Потужність сигналу $P(t) = s^2(t)$
- Енергія сигналу $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$
- Тривалість сигналу T визначає інтервал часу, протягом якого сигнал існує (відмінний від нуля)
- Динамічний діапазон є відношення найбільшої миттєвої потужності сигналу до найменшої $D = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}$
- Ширина спектра сигналу B – смуга частот, що містить основну енергію сигналу
- База сигналу – це добуток тривалості на ширину спектру TB
- Відношення сигнал-шум
- Обсяг інформації, що може передаватися сигналом, характеризує пропускну здатність каналу зв'язку, необхідну для передачі цього сигналу. Він визначається як добуток ширини спектра сигналу на його тривалість і динамічний діапазон: $V=BT D$

Приклад електронного блока управління



Сигнали активних датчиків

- Активні датчики можуть використовувати зондувальні сигнали.
- Наприклад, мати генератор ЕМ випромінювання, яке після відбивання від об'єкту спостереження, формує вхідний сигнал, що приймається і потім підлягає подальшій обробці.

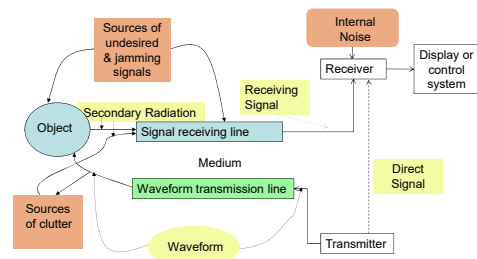
Signal and Accuracy

- It is important to understand how the signal passes through the system, it is amplified and transformed in it.
- It is necessary to go deeper into the relationship between transformations of the signal and the character of the system operation, particularly the accuracy of the system.
- Especially interesting is the influence of signal characteristics in active electronic systems.

Waveforms

- Different waveforms were used in considered methods of measuring coordinates and speed, that is some types of waveforms have been known to us.
- The aim of this topic is:
 - generalize and expand our knowledge about waveforms;
 - classify different waveforms;
 - get some notion about math description of waveforms;
 - to realize that waveforms play basic role in electronic system theory and practice.

Channel structure



Channel

The object is a source of information.

Any channel is subjected to different kinds of noise and disturbances.

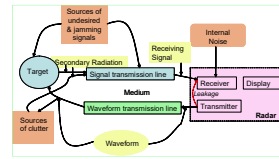
The radiated waveform is "modulated" by the object and transforms into the signal.

Direct signal is used for processing.

The main elements that we should consider are:

- Waveforms (sounding radiation);
- Noise and clutter and their models;
- Object and secondary radiation (scattering, reflection).

Radar Channel



Not only targets but also other objects can be considered as sources of secondary radiation (earth surface, clouds, etc.). They can be both targets and clutters.

Відповідне використання конкретної форми зонд. сигналу буде розглянуто в контексті його часових та частотних характеристик

- **Information** is contained in parameters of the reflected signal (amplitude, frequency, phase, polarization, receive time, receive direction)
- **Medium** brings in distortion into waveforms and signals
- **Attenuation** leads to decrease energetic parameters
- **Refraction** bends the trajectory of the beam and causes errors
- **Interference** of EM wave leads to fading
- **Clutters** mask signal

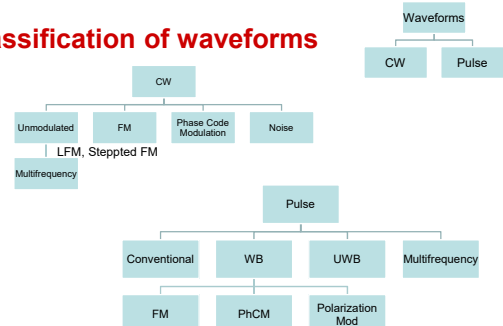
Math Description of Signals

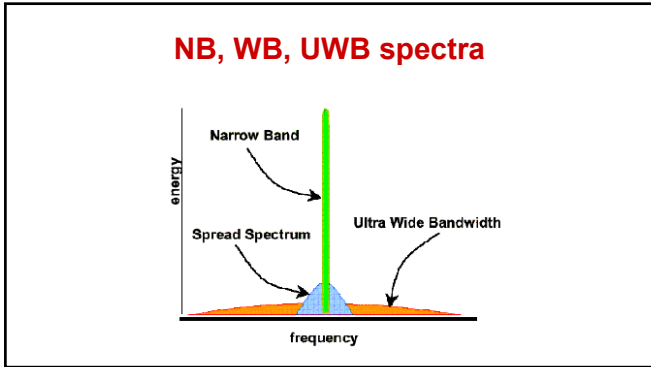
- Waveform is deterministic (mostly)
- Reflected signal always carries random component (more or less)
- Correlation, convolution, spectral analysis, Coding theory
- Examples of waveforms:
 - Rectangular RF pulse
 - Gaussian RF pulse
 - Pulse burst
- Effective pulse duration

- Вибір конкретного типу сигналу та техніка обробки сигналу в електронній системі значною мірою залежить від конкретного призначення та функції системи.
- Вартість та складність, пов'язані з певним типом апаратної та програмної реалізації сигналу, є основними факторами у процесі прийняття рішень про вибір інженерного рішення.
- Радіолокаційні системи можуть використовувати CW або імпульсні форми хвиль з модуляцією або без модуляції. Методи модуляції можуть бути як аналоговими, так і цифровими.
- Роздільна здатність за дальністю та доплерівським зсувом безпосередньо пов'язані з конкретними характеристиками зондувального сигналу.

- Knowledge of the power spectrum density of a waveform is very critical.
- In general, signals or waveforms can be analyzed using time domain or frequency domain techniques.
- We consider many of the most commonly used waveforms.
- Relevant use of a specific waveform will be addressed in the context of its time and frequency domain characteristics.

Classification of waveforms





Low Pass and Band Pass Wave Forms

- Signals that contain significant frequency composition at a low frequency band that includes DC are called Low Pass (LP) signals.
- Signals that have significant frequency composition around some frequency away from the origin are called Band Pass (BP) signals

Відповідно і фільтри НЧ, ВЧ, Смугові, Режекторні

Найбільш поширені смугові сигнали, точніше вузько-смугові

Mathematically, BP signal: $x(t) = r(t) \cos(2\pi f_0 t + \psi_x(t))$
Envelope (AM) Carrier f Phase M

The frequency modulation is $f_m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi_x(t)$

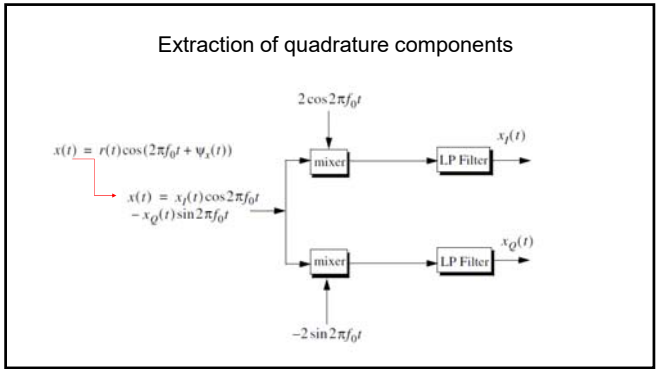
The instantaneous frequency is $f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_0 t + \psi_x(t)) = f_0 + f_m(t)$

If $B \ll f_0$ it is NB – narrow band pass signal (NB)

Band pass signals can also be represented by two low pass signals known as the quadrature components

$$x(t) = x_I(t) \cos 2\pi f_0 t - x_Q(t) \sin 2\pi f_0 t$$

x_I and x_Q - real LP signals referred as quadrature components (In-phase and Quadrature components)



Spectral and correlation analysis

- A time domain signal has a Fourier Transform (FT)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$
- Inverse FT

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$
- The signal autocorrelation function

$$R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t) f(t + \tau) dt$$

The asterisk indicates complex conjugate

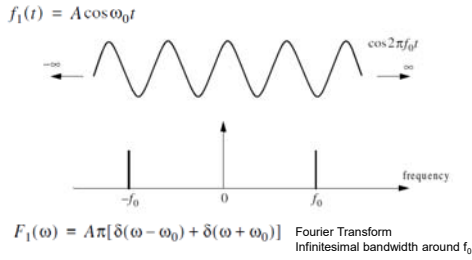
- The signal amplitude spectrum is $|F(\omega)|$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$
- Power spectral density (PSD) $S_f(\omega)$ is the FT of the autocorrelation function

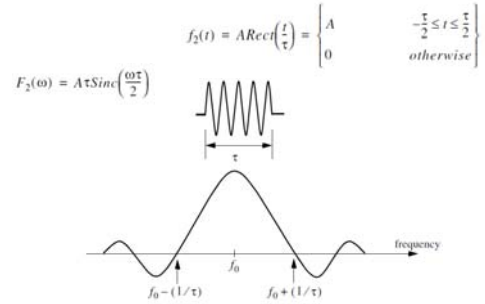
$$\bar{S}_f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{R}_f(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau$$

$$R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t) f(t + \tau) dt$$

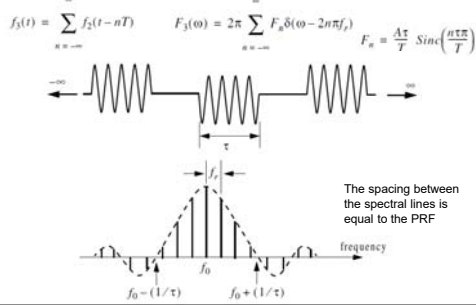
Amplitude spectrum for a continuous sine wave



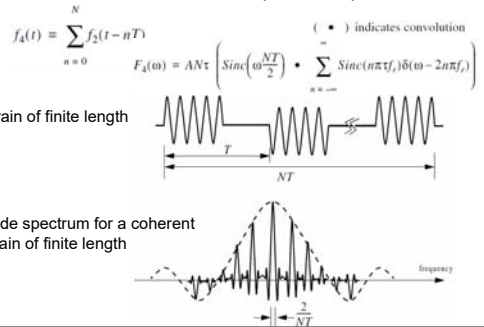
Amplitude spectrum for a single pulse, or a train of non-coherent pulses



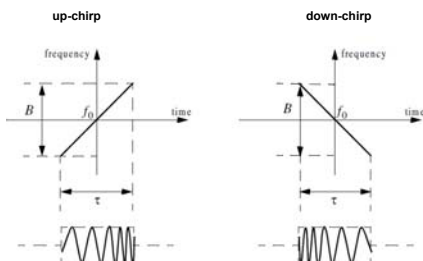
Coherent gated CW waveform, or coherent pulse train of infinite length



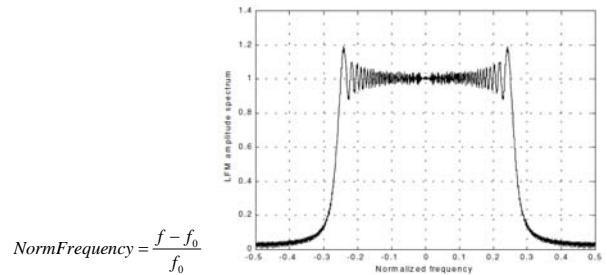
A limited duration of the previous pulse train



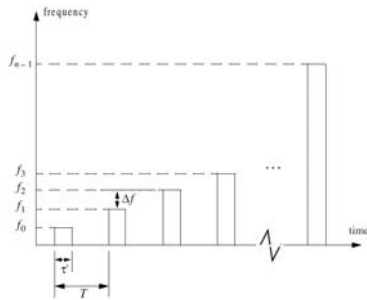
Typical LFM Modulation Waveforms



Typical spectrum for an LFM waveform



Stepped frequency waveform (SFW) burst



Stepped Frequency Waveforms

SFWs produce synthetic HRR target profiles because the target range profile is computed by means of Inverse Discrete FT of frequency domain samples of the actual target range profile.

Each pulse can have its own LFM, or other type of modulation.

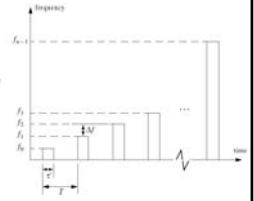
The center frequency for the i^{th} step is:

$$f_i = f_0 + i\Delta f \quad ; \quad i = 0, n-1$$

Within a burst, the transmitted waveform for the i^{th} step can be described as

$$s_i(t) = \begin{cases} C_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) & ; \quad iT \leq t \leq iT + \tau \\ 0 & ; \quad \text{elsewhere} \end{cases}$$

θ_i - relative phases C_i - are constants



Difference between detection and measurement procedures

While radar detection is implemented by threshold rule that is applied to output voltage, range measuring procedure consists in **search of a maximum** of the same function.

- Detection – comparison with threshold level
- Optimal measurement – finding maximum
- This concerns any measured value (angle, range or velocity)

Optimal range measurement

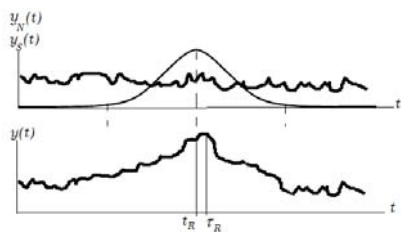
$$x(t) = s(t - t_{delay}) + n(t)$$

$$y(t) = y_s(t) + y_n(t)$$

$$y_s(t) = \int s(t - t_{delay})h(t - \tau)d\tau$$

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} n(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

Influence of noise



$$\text{Error} = |t_R - \tau_R|$$

Error is caused by noise!!! (R=ct/2)

Measurement

- Measurement is a separate task.
- Classical theory rigorously proves that to provide high-accuracy of measuring both target range and velocity, the waveform should be long-continued (accurate measurement of Doppler shift) and as wideband as possible (accurate measurement of time delay).
- This means using WB waveforms with $B\tau \gg 1$

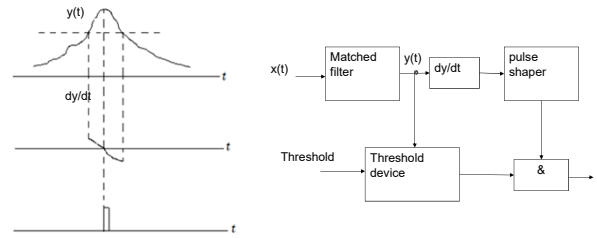
Potential Range Accuracy

- The error is less if the SNR is more
- The error is less if the width of peak is less
- The peak is narrower if the waveform spectrum is wider
- Accuracy of range measurement is characterized by rms of error $\sigma(R)=\sigma_R$

$$\sigma_{Pot}^2(R) \propto \frac{1}{\omega_{eff}^2 \cdot \frac{2E}{N_o}}$$

Effective spectrum width SNR

How to find maximum?



Potential Velocity Accuracy

- Velocity measurement is reduced to f_d measurement
- Accuracy is better if spectrum width narrower; The best is monochromatic waveform
- That means that the requirements are contrary
- Accuracy of velocity measurement is characterized by rms of error $\sigma(v)=\sigma_V$

$$\sigma_{Pot}^2(v) \propto \frac{\omega_{eff}^2}{2E \cdot N_o}$$

Effective spectrum width SNR

Accuracy is opposite to Error

- Potential accuracy of time (range) measurement $\frac{1}{\sigma_r^2} \propto SNR \times \omega_{eff}^2$
- Potential accuracy of Doppler (velocity) measurement $\frac{1}{\sigma_f^2} \propto SNR \times \tau_{eff}^2$
- Effective duration and effective spectrum width are opposite

$$\omega_{eff} \approx \frac{1}{\tau_{eff}}$$

Uncertainty principle

$$R \leftrightarrow t_{delay} \quad V \leftrightarrow F_{Doppler}$$

$$\sigma_r \cdot \sigma_f = \frac{1}{q_0 \omega_{eff} \cdot \tau_{eff}}$$

$$F = \frac{2V_r}{\lambda} = \frac{2V_r}{c} f_0 \quad t_{delay} = \frac{2R}{c}$$

$$\sigma_R \cdot \sigma_V = \left(\frac{c}{2}\right)^2 \frac{1}{f_0 q_0^2 \omega_{eff} \cdot \tau_{eff}}$$

- Equivalent (effective) spectrum width is proportional to the spectrum width of the signal itself $\Delta f=B$
- Equivalent (effective) duration of the signal is proportional to duration of the signal itself T_0
- Values Δf and T_0 are related between themselves by FT and their property is:

$$\Delta f \cdot T_0 = K = \text{const}$$

K – is the basis of the signal

At the output of MF or optimal correlation receiver, the ACF of the signal is created

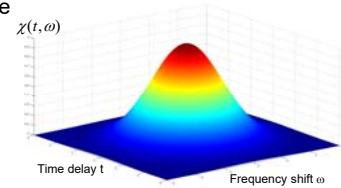
- This ACF in generalized form is named 'Ambiguity Function' (AF). It plays important role in characterization of the signal.
- In complex form AF can be written as:

$$\chi(t, \omega) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(\tau + \frac{t}{2}) \cdot \dot{s}^*(\tau - \frac{t}{2}) \cdot e^{j\omega\tau} d\tau$$

- Module of this function $\chi(t, \omega)$ is sometimes a very complicated surface.
- At $\omega=0$ we get a section of this surface in the plane of time axis. In this case $\chi(t, 0)$ is just an ACF of signal envelope.
- At $t=0$ – section in plane of frequency axis $\chi(0, \omega)$.

Example – a bell-shape pulse

- Uncertainty principle



At $\omega=0$ we get a section of this surface in the plane of time axis. In this case $\chi(t, 0)$ is just an ACF of signal envelope.
At $t=0$ – section in plane of frequency axis $\chi(0, \omega)$.

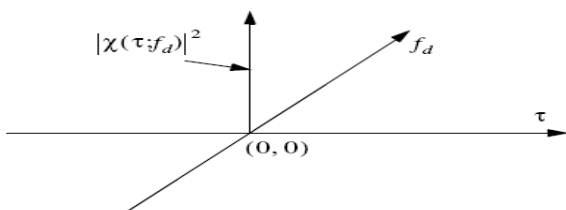
Ambiguity Function

- The radar ambiguity function represents the output of the matched filter, and it describes the interference caused by range and/or Doppler of a target when compared to a reference target of equal RCS.
- Двовимірна функція $\chi(\tau, f_d)$, що представляє собою залежність величини відгуку узгодженого фільтра на сигнал, зсунутий за часом на τ і по частоті на Δf відносно сигналу, узгодженого з цим фільтром. Іншими словами, вона характеризує ступінь відмінності відгуків фільтра на сигнали з різною часовою затримкою (дальністю) і частотною затримкою (радіальна швидкість).
- Ambiguity function evaluated at $(\tau, f_d)=(0,0)$ is equal to the matched filter output that is matched perfectly to the signal reflected from the target of interest. In other words, returns from the nominal target are located at the **origin of the ambiguity function**.
- Thus, the ambiguity function at nonzero τ and f_d represents returns from some range and Doppler different from those for the nominal target.
- Таким чином, функція невизначеності у нульових τ та Δf являє собою відгук з деякої дальності та за доплерівського зсуву, відмінних від значення для номінальної цілі

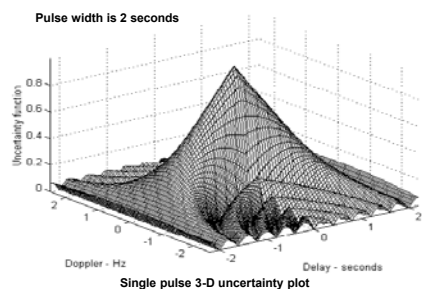
Ambiguity Diagram

- The radar ambiguity function is normally used by radar designers as a means of studying different waveforms. It can provide insight about how different waveforms may be suitable for the various radar applications.
- It is also used to determine the range and Doppler resolutions for a specific radar waveform.
- The three-dimensional (3-D) plot of the ambiguity function versus frequency and time delay is called the radar **ambiguity diagram**.

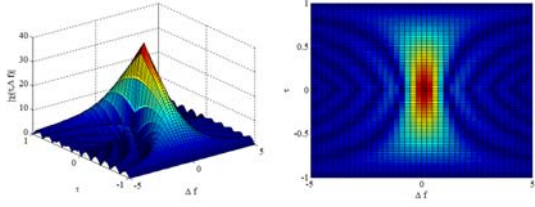
Ideal Ambiguity Function



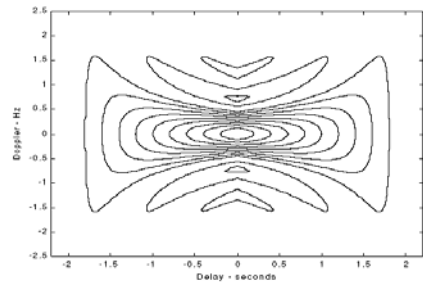
Single Pulse Ambiguity Function



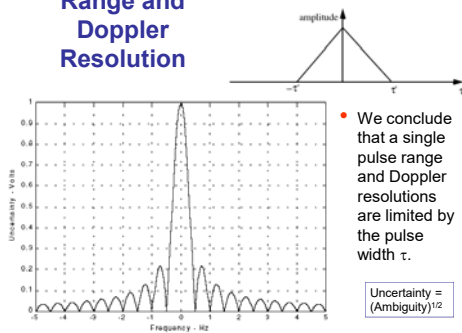
Модуль ФН прямокутного імпульсу



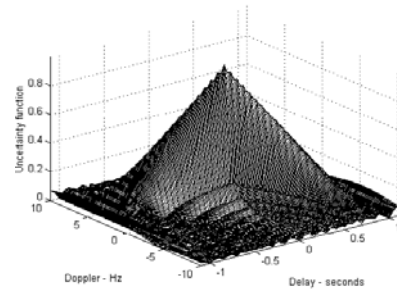
Contour plot corresponding to previous 3-D plot



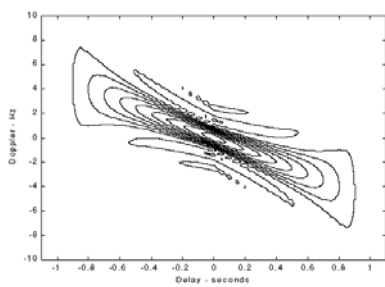
Range and Doppler Resolution



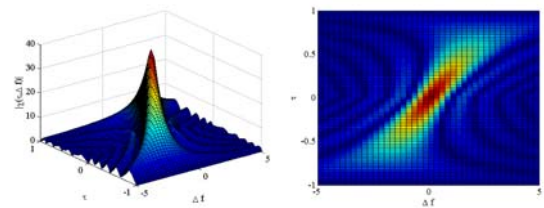
LFM Ambiguity Function



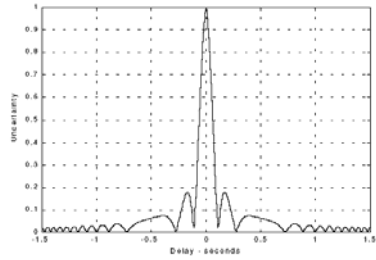
LFM Ambiguity Function Contour Plot



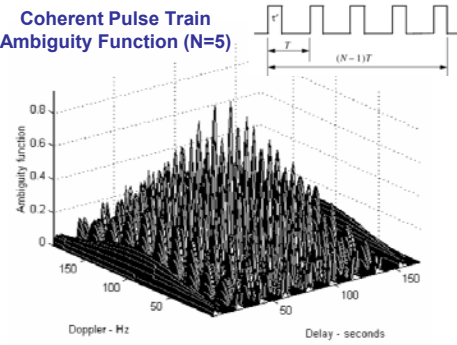
Модуль ФН ЛЧМ імпульсу



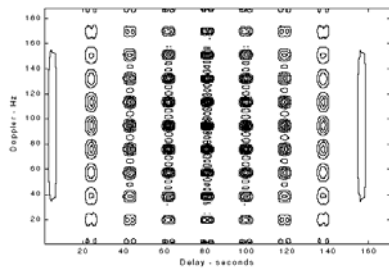
Zero Doppler Ambiguity function of an LFM pulse
($\tau=1s$, $B=20$ Hz)



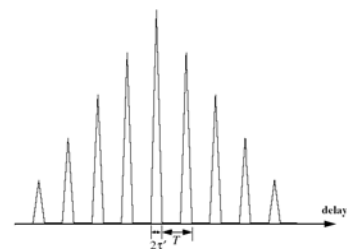
Coherent Pulse Train
Ambiguity Function ($N=5$)



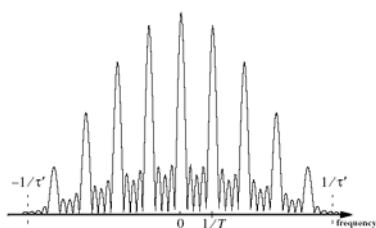
Contour plot for AF of pulse train



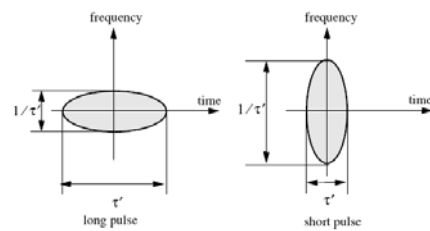
Zero Doppler cut of pulse train AF



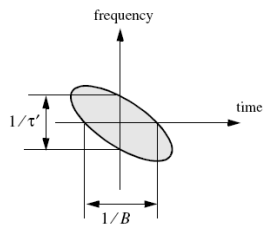
Zero frequency shift cut of pulse train AF



Ambiguity contour plot associated with a sinusoid modulated gated CW pulse



Ambiguity contour plot associated with an up-chirp LFM waveform



ЧМ-импульс с линейным нарастанием частоты

The best waveform ☺

Note that the best waveform with respect to a criterion of simultaneous measuring target range and velocity is the **ideal noise signal** because it has ambiguity function, which is similar to the delta-function located in a point of searched maximum.

