ЛЕКЦІЯ 7

Сигнали та їх моделі

Кодування сигналів у каналах зв’язку

Від фізичної величини — до лінійного коду.

НЕПЕРЕРВНИЙ СИГНАЛ



ІМПУЛЬСНА МОДЕЛЬ



ЛІНІЙНЕ КОДУВАННЯ



План лекції

01 Сигнали та їх класифікація.

02 Математичні моделі простих сигналів.

03 Математичні моделі складних неперервних сигналів.

04 Математичні моделі дискретних сигналів. Види модуляції.

05 Методи фізичного (лінійного) кодування цифрових сигналів у каналах зв’язку.

Від повідомлення до відновленого сигналу

ПЕРЕТВОРЕННЯ ДИСКРЕТНОГО ПОВІДОМЛЕННЯ В КАНАЛІ ЗВ’ЯЗКУ

Повідомлення a → **Код 01101** → **Первинний сигнал** → **Модульований сигнал**

Передавання: інформаційний параметр → сигнал





Прийняте коливання → **Прийнятий первинний** → **Регенерований сигнал** → **Код → повідомлення â**







`01101 → â`

Фізична природа сигналів

МАТЕРІАЛЬНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ОСНОВА

Інформація сприймається споживачем через сигнали, які генеруються безпосередньо джерелом або за допомогою генераторів, не зв’язаних із джерелом (локація).

Світлові потоки Звукові хвилі	Теплове випромінювання Зображення точок	Електричні поля Магнітні поля

Сигналами також можуть бути документи, книжки, графіки, таблиці тощо. Отже, сигнали різняться за фізичною природою.

Первинний перетворювач переводить інформаційний параметр у сигнал, зручний для подальшої обробки.

Переносник та інформаційний параметр

МОДУЛЯЦІЯ ПЕРЕТВОРЮЄ ПЕРЕНОСНИК НА НОСІЯ ІНФОРМАЦІЇ

Матеріальну основу переносника інформації складає фізичний об’єкт або процес із набором параметрів. Один із них стає інформаційним, якщо змінюється під впливом джерела інформації.

Переносник → **Модуляція параметра** → **Носій інформації**

Частота коливань = 0

Інформаційний параметр — рівень струму або напруги.

Частота коливань ≠ 0

Параметрами можуть бути амплітуда, частота або фаза коливань.

Два види електричних сигналів

СИГНАЛИ СТРУМУ ТА СИГНАЛИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Сигнали електричного струму

Вимірювальну, звукову та візуальну інформацію перетворюють у сигнали електричного струму.

Їх використовують у системах автоматичного керування, телебаченні та інших системах обробки.

Сигнали електромагнітного поля

Для безпровідного передавання інформації на відстань використовують сигнали електромагнітного поля — радіосигнали.

Сигнал — матеріальне втілення інформації; процес зміни фізичної величини, пов’язаної з енергією.

Неперервні, імпульсні та цифрові сигнали

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗА ЧАСОМ І РІВНЕМ

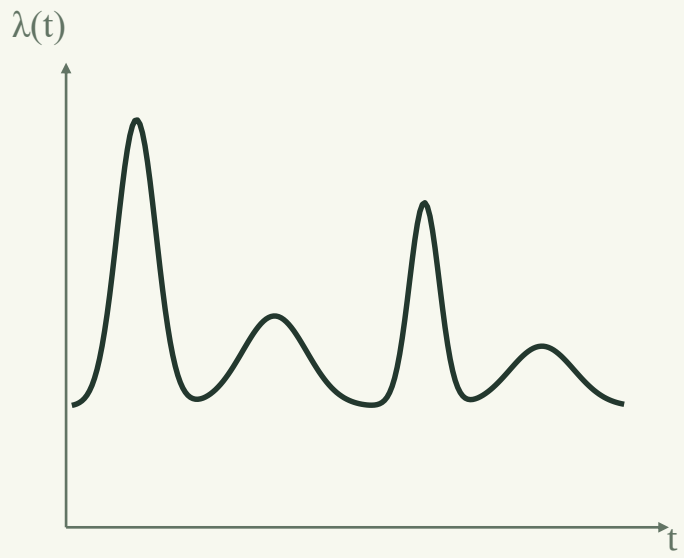
Вид сигналу	Час	Рівень
Аналоговий (неперервний)	Неперервний	Неперервний
Імпульсний	Дискретний	Неперервний
Цифровий	Дискретний	Дискретний

Аналогові сигнали представлені неперервними в часі фізичними процесами. Дискретні сигнали представлені своїми значеннями у дискретні моменти часу; їх поділяють на імпульсні та цифрові.

Подання сигналу: неперервність і рівні

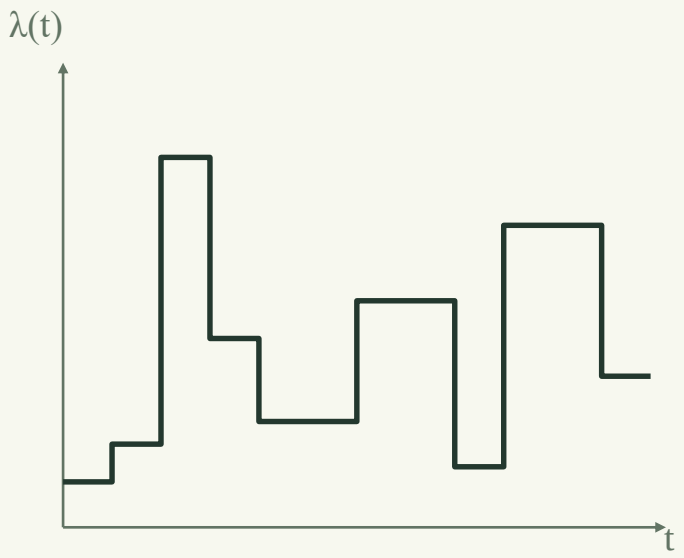
РИСУНКИ А–В • ФОРМИ ПОДАННЯ СИГНАЛУ

а Неперервна крива



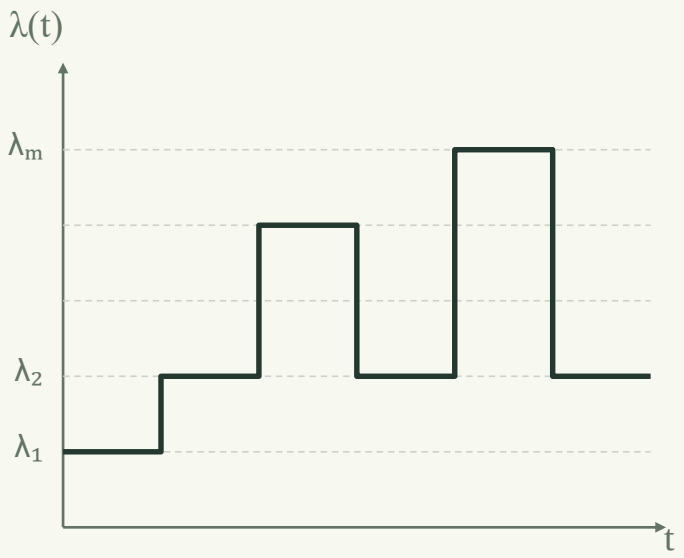
Значення змінюється неперервно.

б Зміна рівня



Ілюстрація ступінчастого сигналу.

в Фіксовані рівні

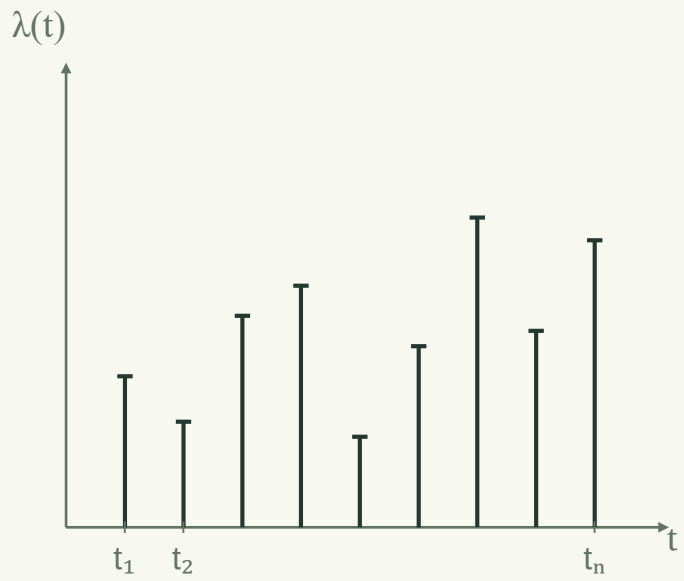


На рисунку виділено рівні $\lambda_1 \ldots \lambda_m$.

Подання сигналу: дискретні відліки

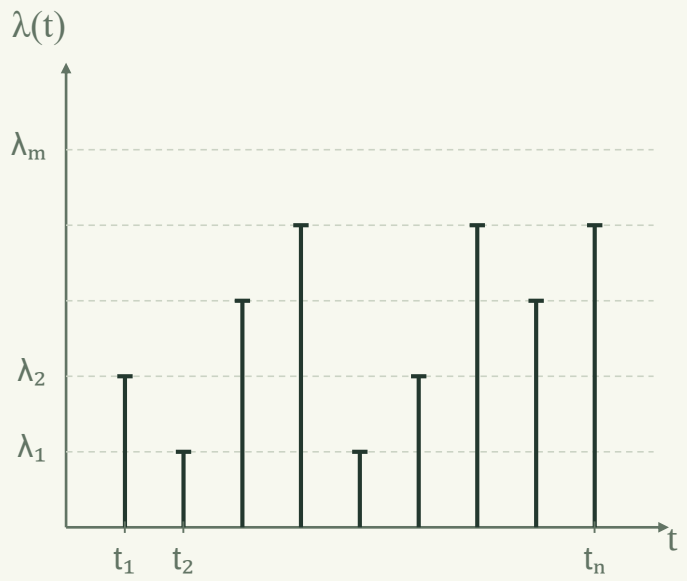
РИСУНКИ Г–Е • ЧАСОВІ МОМЕНТИ ТА КВАНТИ РІВНЯ

г Дискретизація



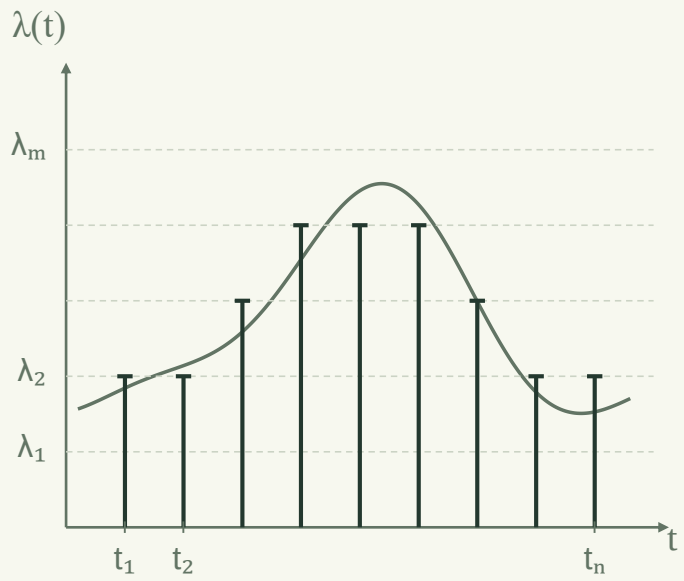
Відліки у визначені моменти часу.

д Дискретні рівні



Дискретність і за часом, і за рівнем.

е Відліки й крива

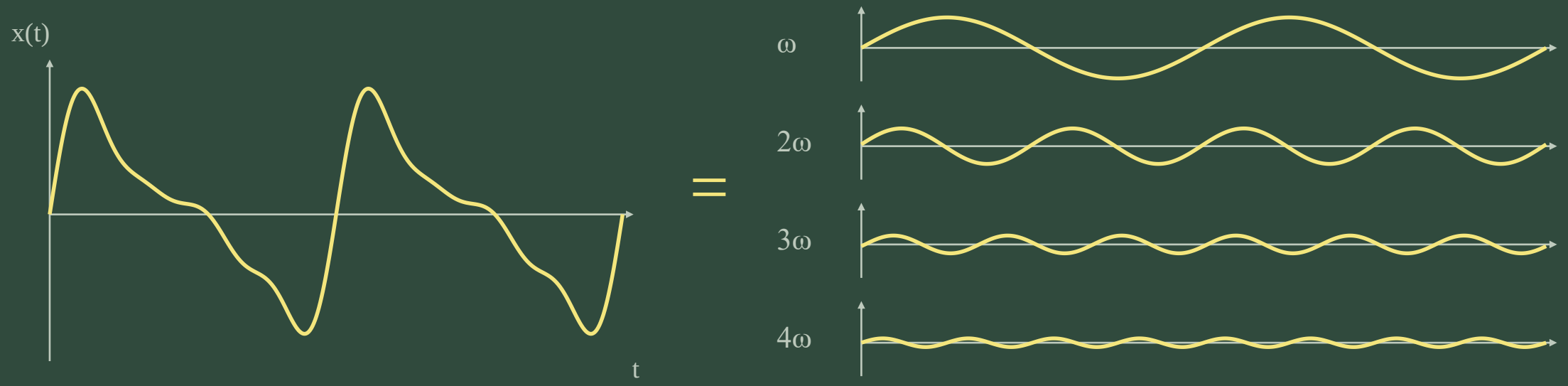


Графічне зіставлення з неперервним сигналом.

Періодичний сигнал як сума гармонік

РИСУНОК • ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ

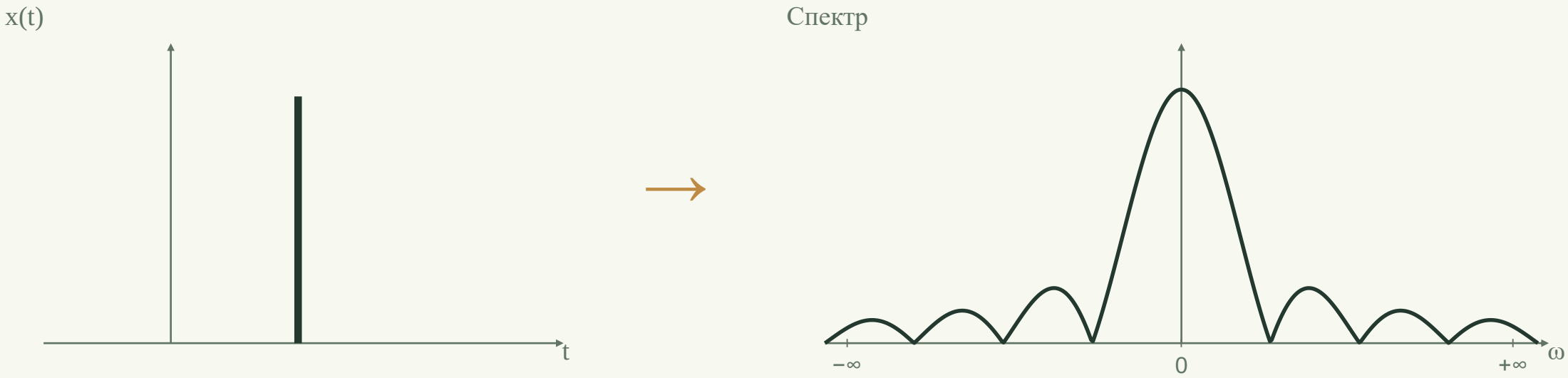
Будь-який періодичний процес можна представити сумою синусоїдальних коливань різних частот і різних амплітуд.



Кожна складова синусоїда — гармоніка; сукупність гармонік утворює спектральне розкладання сигналу.

Імпульс і спектральне подання

Спектральний поділ ідеального імпульсу («одиничної потужності і нульової тривалості») має складові всього спектра частот: від −∞ до +∞.†

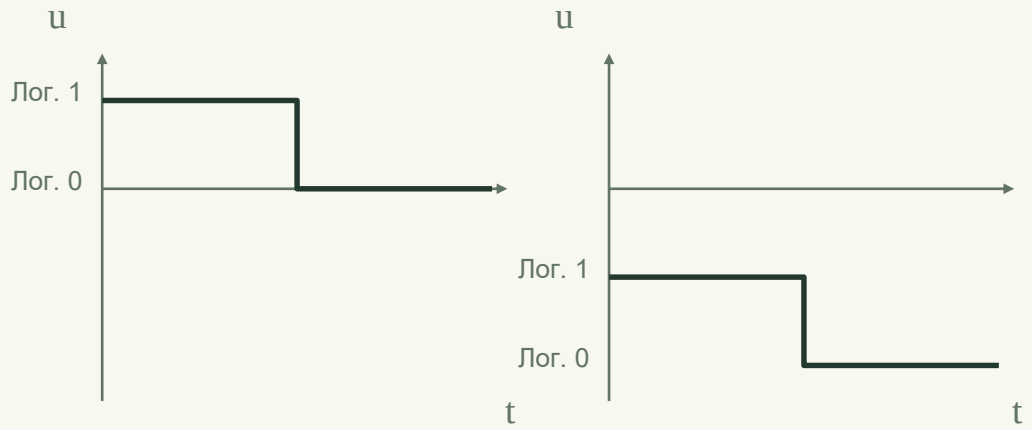


Потенційні сигнали: позитивна і негативна логіка

РИСУНОК • ВІДПОВІДНІСТЬ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ ЛОГІЧНОМУ

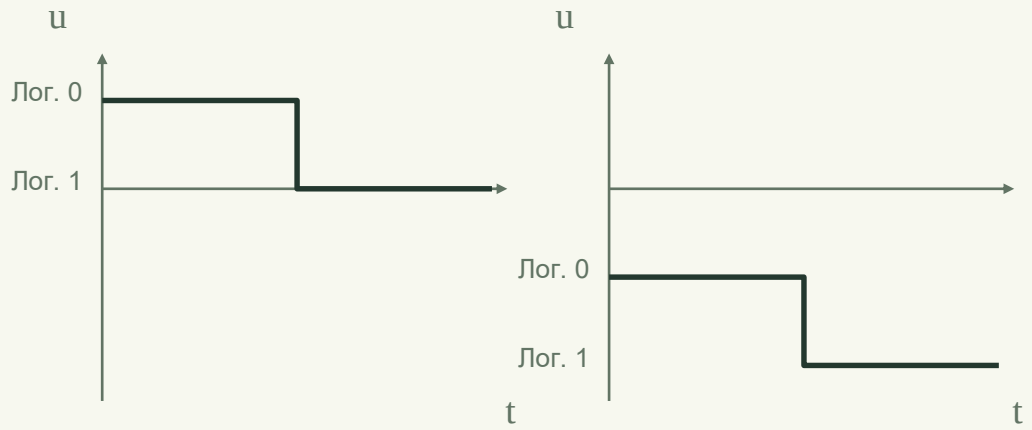
Позитивна логіка

Високий рівень → лог. 1
Низький рівень → лог. 0



Негативна логіка

Низький рівень → лог. 1
Високий рівень → лог. 0



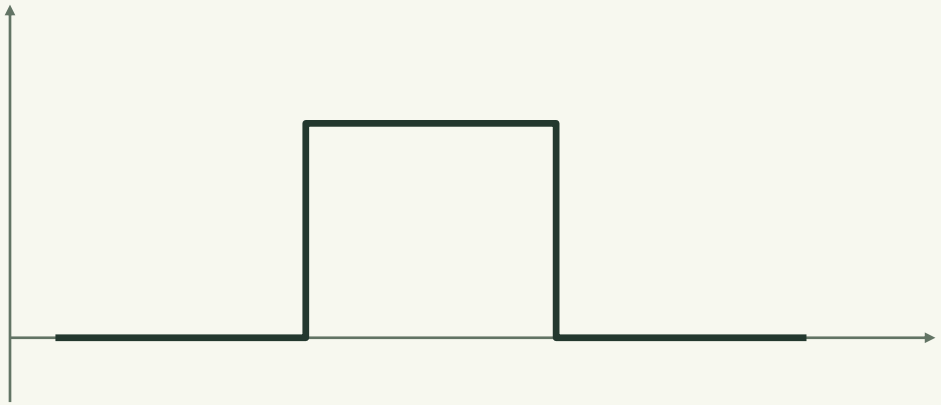
Потенційний сигнал має два фіксовані рівні напруги — логічні рівні.
Перепад напруг — швидка, майже стрибкоподібна зміна між цими рівнями.

Елементи цифрового сигналу

РИСУНОК • РІВНІ, ПЕРЕДНІЙ І ЗАДНІЙ ФРОНТИ

Додатний сигнал

Активний рівень (лог. 1)



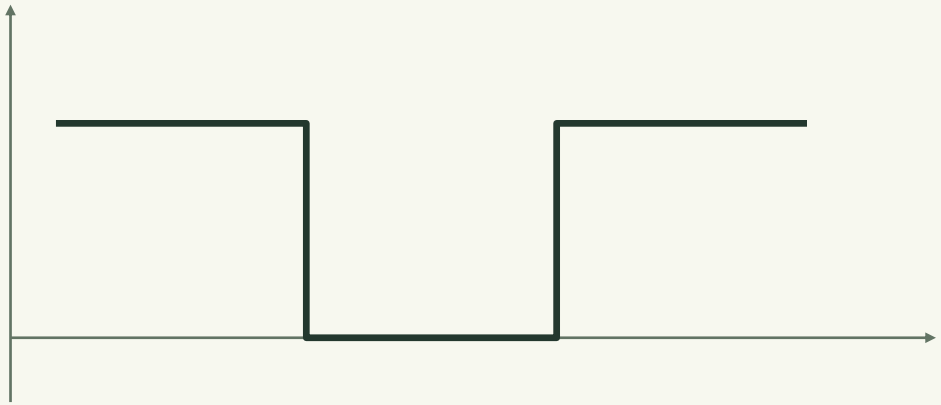
Пасивний рівень (лог. 0)

Передній
додатний фронт

Задній
від’ємний фронт

Від’ємний сигнал

Пасивний рівень (лог. 1)



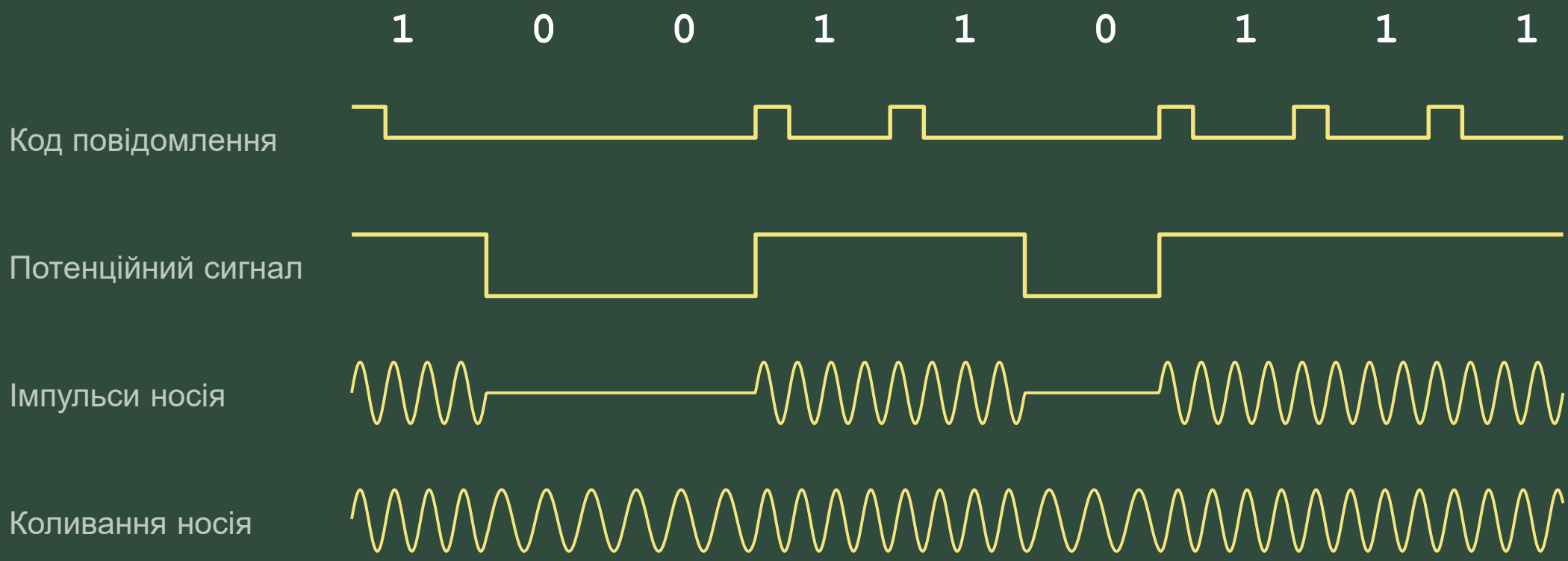
Активний рівень (лог. 0)

Передній
від’ємний фронт

Задній
додатний фронт

Двійкові дані та сигнали-переносники

БЕЗПОСЕРЕДНЯ ПЕРЕДАЧА ІМПУЛЬСАМИ І РАДІОСИГНАЛИ-НОСІЇ

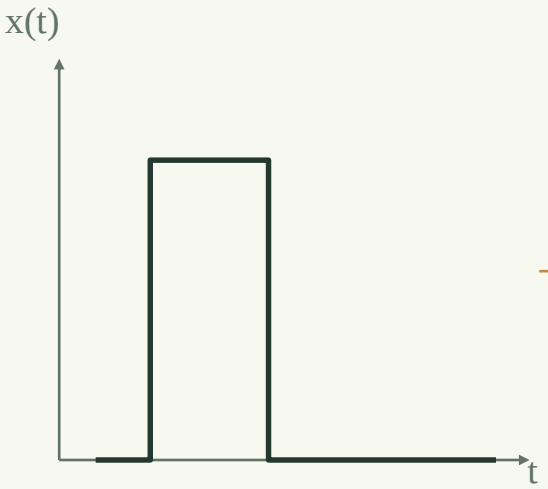


Для передавання двійкових даних використовуються імпульсні сигнали.

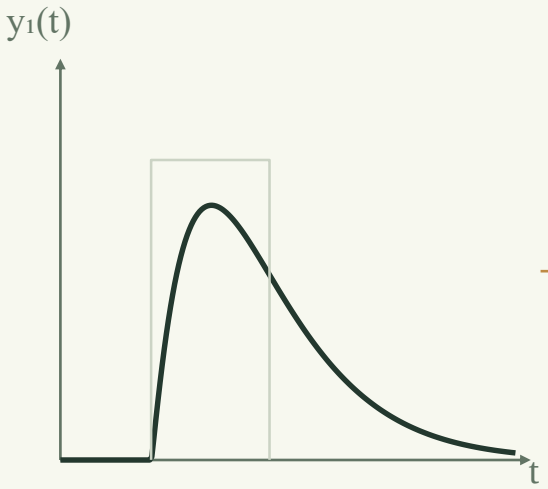
Спотворення та відновлення форми імпульсу

ТИПОВЕ ВИКРИВЛЕННЯ ПІД ЧАС ПЕРЕДАВАННЯ

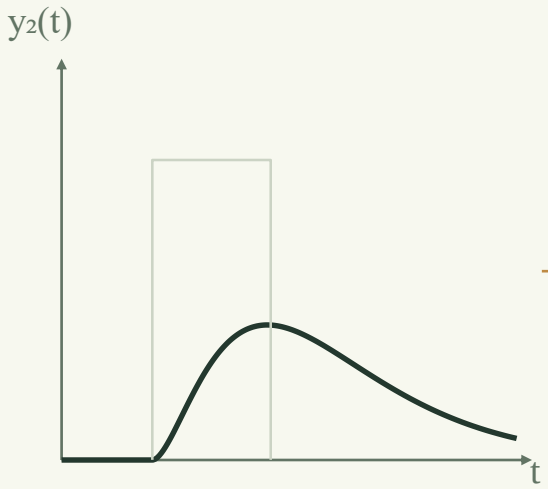
Вихідний імпульс



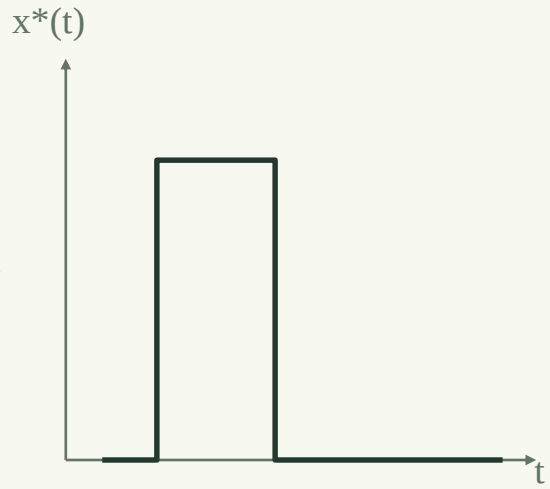
Відстань l_1



Відстань $l_2 > l_1$



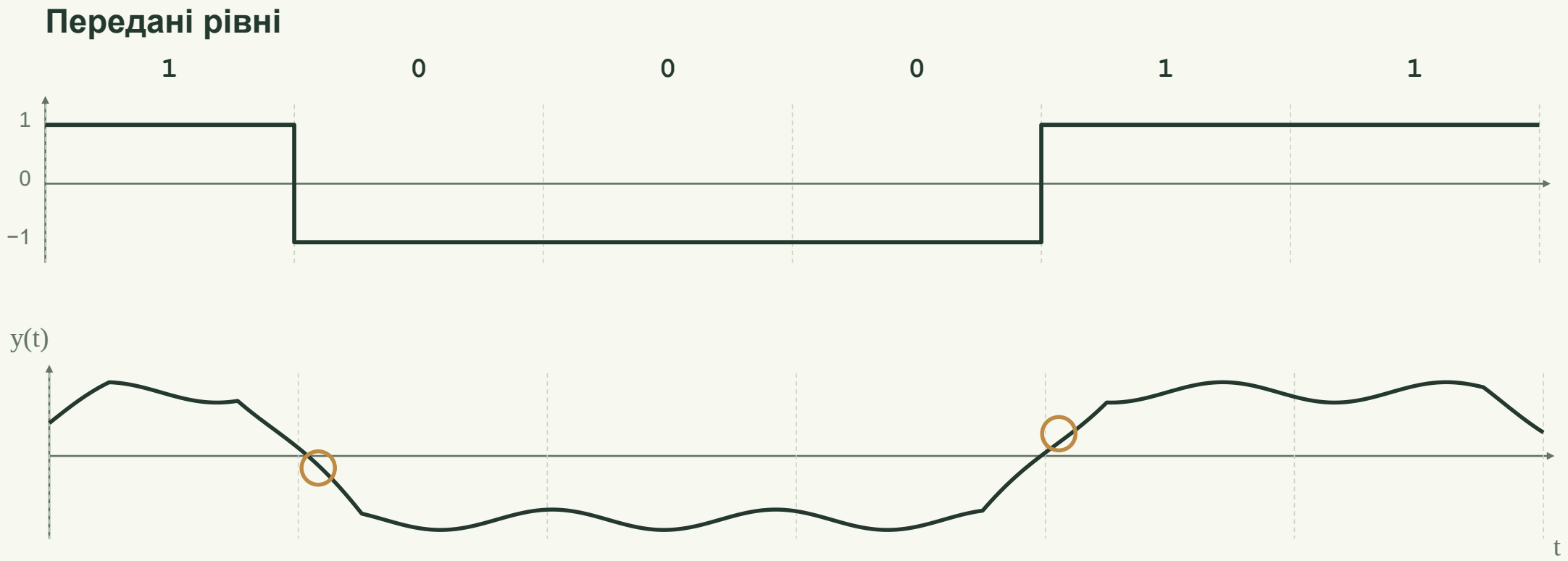
Відновлений імпульс



Чим далі передається імпульс, тим помітніше може змінюватися його форма; регенерація відновлює рівні.

Міжсигнальна інтерференція

СУСІДНІ ІМПУЛЬСИ ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУ ПРИЙНЯТОГО СИГНАЛУ



На рисунку виділено ділянки викривлення поблизу переходів сигналу – міжсигнальна інтерференція.

Шум і характеристики завад

ВИКРИВЛЕННЯ СИГНАЛУ ВИПАДКОВИМ ШУМОМ

Джерела

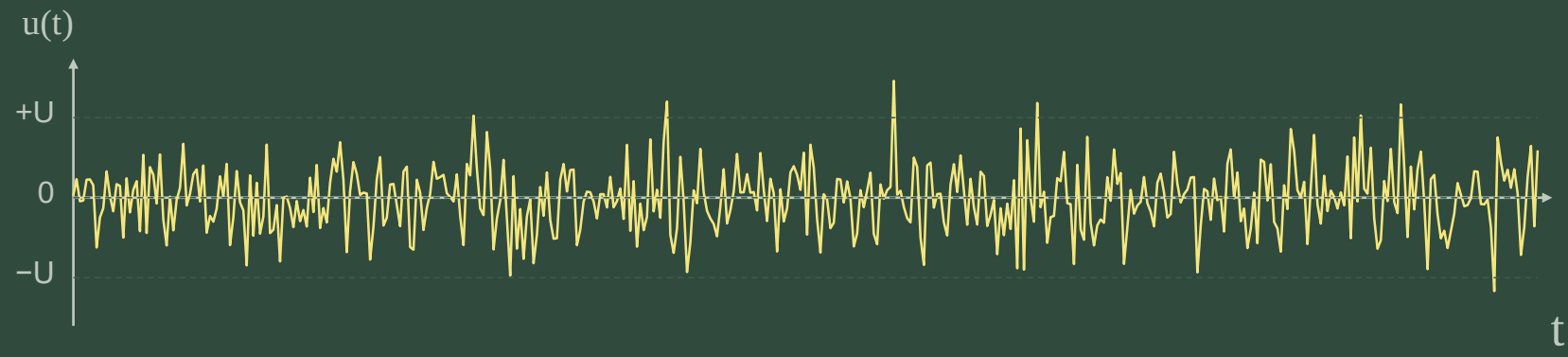
Завади в каналі. Непереборний тепловий шум.

Накладання

Адитивний вплив. Мультиплікативний вплив.

Локалізація

У часі. У спектрі. «Білий шум».

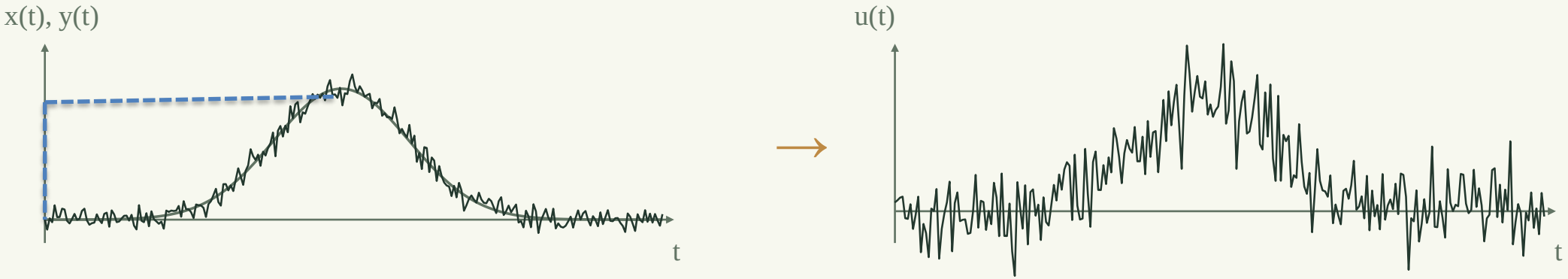


«Білий шум» є максимально непередбачуваним.

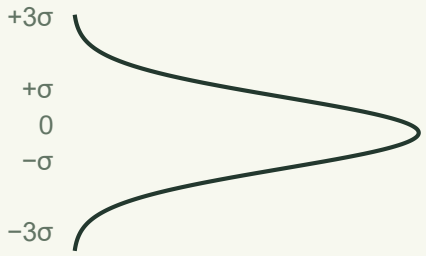
Випадковий шум: форма сигналу та рівні

ВИКРИВЛЕННЯ ШУМОМ • РОЗПОДІЛ АМПЛІТУД • V_nRMS І V_nPP

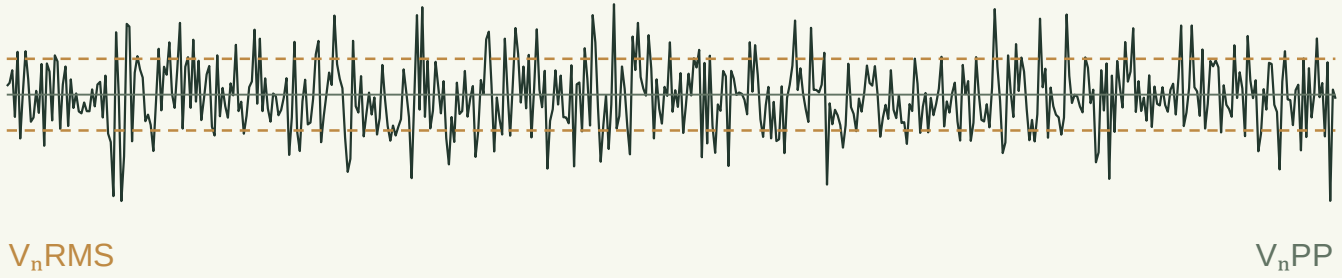
Спотворення сигналу випадковим шумом



Розподіл амплітуд



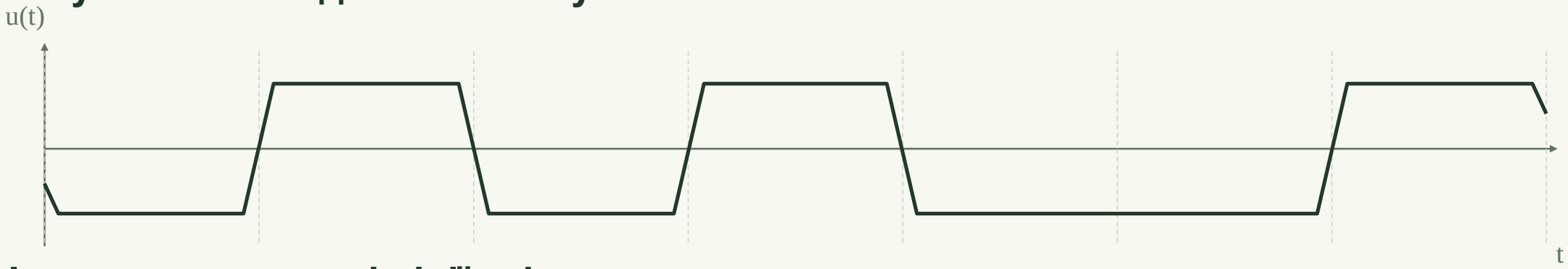
Шумові рівні: середньоквадратичний та піковий



Вхід і вихід лінії зв’язку

РИСУНОК • ЧАСОВІ ДІАГРАМИ СПОТВОРЕННЯ ІМПУЛЬСІВ

Імпульси на вході лінії зв’язку



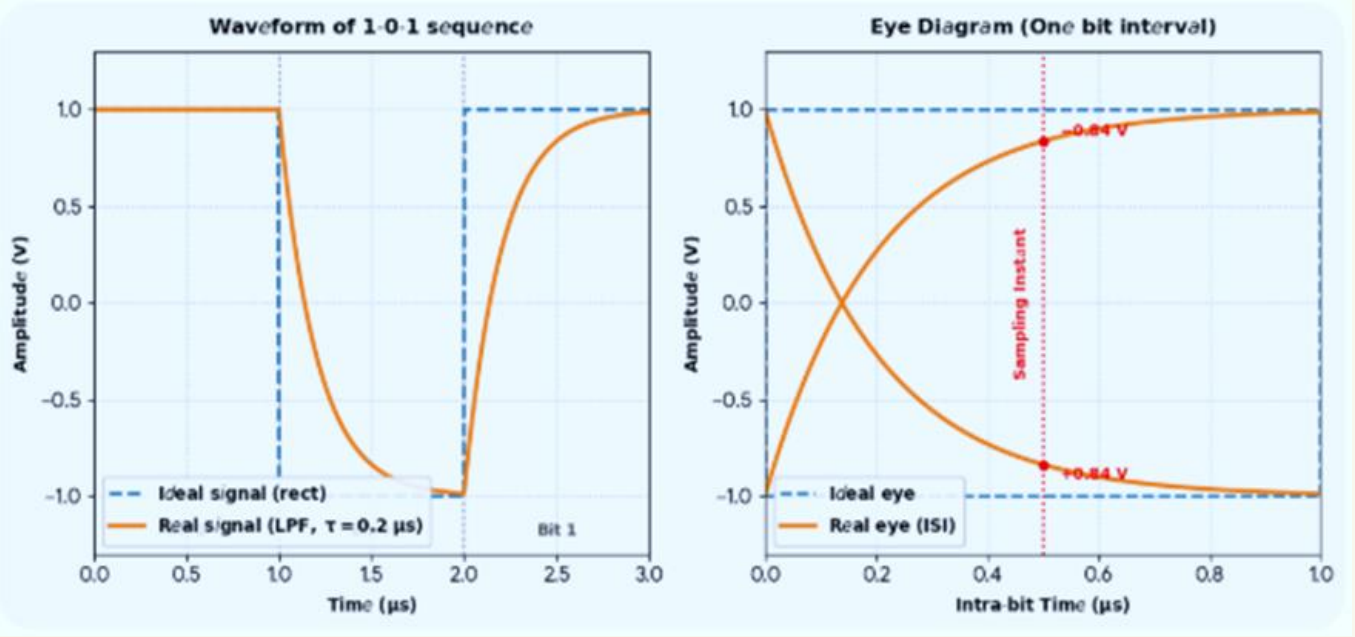
Імпульси на виході лінії зв’язку



Поняття діаграми «Ока» та джитера (Jitter, тремтіння фази сигналу) переважно розглядаються на стику теорії інформації, теорії електричного зв'язку та телекомунікаційних систем передавання даних.

Формується діаграма «Ока» за принципом накладання: осцилограф синхронізується з тактовою частотою передачі даних (символьною швидкістю) і накладає бітові комбінації (000, 010, 101, 111 тощо) в одному часовому вікні.

В ідеальному каналі без шумів і з нескінченною смугою пропускання всі лінії переходів збігалися б, утворюючи чіткий прямокутник. У реальному каналі передачі даних (кабель представляє собою по суті фільтр нижніх частот) фронти імпульсів завалюються, з'являються шуми та зсуви фази, через що лінії «розмазуються» і утворюють овал, схожий на око.



Діаграма «Ока» показує якість каналу передачі інформації відповідно параметрам «розкриття ока» в центрі символьного інтервалу (момент часу, в який приймач ухвалює рішення - прийнято «0» чи «1»):

- висота розкриття «ока» (запас завадостійкості): вертикальна відстань між верхнім і нижнім рівнями в центрі діаграми. Чим вона більша, тим сильніший шум витримає система без помилок;
- ширина розкриття «ока» (часовий запас): горизонтальна ширина «чистої» області всередині «ока», яка показує точність моменту відліку, коли приймач може безпомилково зчитати біт;
- джитер: розмиття ліній по горизонталі в точках перетину (переходу сигналу через нуль). Вказує на нестабільність фази тактової частоти або спотворення в каналі передачі даних (кабелі).
- міжсимвольна інтерференція: у реальних каналах передачі інформації через обмежену смугу частот та дисперсію імпульси «розпливаються» у часі й наповзають один на одного на сусідніх тактових інтервалах. На діаграмі це призводить до звуження внутрішньої «чистої області». Тобто, попередні імпульси не встигають затухнути і накладаються на наступні. На діаграмі це виглядає як сильне «запливання» або повне закриття «ока» і виникають помилки в процесі приймання сигналів (імпульсів) та ідентифікації кодових комбінацій.

Переваги цифрових сигналів

ОБРОБКА • ЗБЕРІГАННЯ • ПЕРЕДАВАННЯ • ПРИСТРОЇ

1. Допустимий складний багатоступеневий обробіток.
2. Тривале зберігання без втрат; можливість багаторазового копіювання без спотворень.
3. Якісне передавання на великі відстані без спотворення.
4. Цифрові пристрої менш схильні до старіння, їх простіше налаштовувати.
5. Поведінку цифрових пристроїв можна точно розрахувати і завжди передбачити.

Переваги цифрових сигналів

ОБРОБКА • ЗБЕРІГАННЯ • ПЕРЕДАВАННЯ • ПРИСТРОЇ

1. Допустимий складний багатоступеневий обробіток.
2. Тривале зберігання без втрат; можливість багаторазового копіювання без спотворень.
3. Якісне передавання на великі відстані без спотворення.
4. Цифрові пристрої менш схильні до старіння, їх простіше налаштовувати.
5. Поведінку цифрових пристроїв можна точно розрахувати і завжди передбачити.

Недоліки цифрових сигналів

ШВИДКОДІЯ • МІСТКІСТЬ • ПЕРЕТВОРЕННЯ • СКЛАДНІСТЬ

Швидкодія

Принципово менша гранична швидкодія цифрових пристроїв порівняно з аналоговими.

Інформаційна місткість

Інформаційна місткість менша, ніж аналогового сигналу. Для його заміни потрібні 4–16 цифрових сигналів — код.

Перетворення

У реальних умовах потрібні АЦП на вході та ЦАП на виході.

Складність пристроїв

При простому алгоритмі обробітку цифрові пристрої набагато складніші за аналогові.

Цифрові пристрої — пристрої, що працюють із цифровими сигналами.

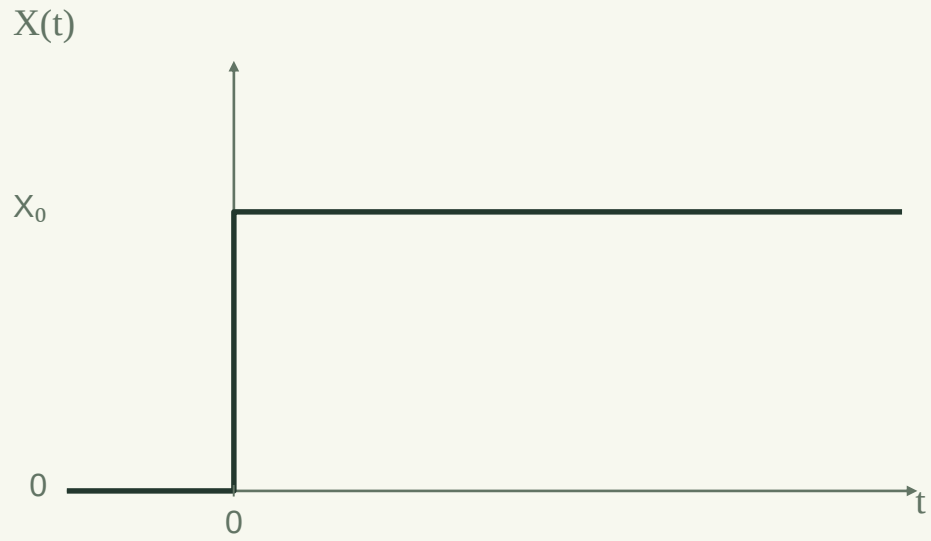
МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОСТИХ СИГНАЛІВ

Східчастий сигнал

До елементарних сигналів належать східчастий сигнал, одиничний імпульс і гармонічний синусоїдний сигнал.

$$x(t)=0, \quad t<0$$

$$x(t)=X_0, \quad t>0$$



Сигнал вмикання: інформативним параметром є його рівень X_0.

Сигнал рівня у вимірювальних системах

ЧИСЛОВЕ ЗНАЧЕННЯ РІВНЯ X_0 Є ІНФОРМАЦІЄЮ

У системах передавання інформації східчастий сигнал представляється струмом або напругою постійного струму. Його застосовують для передавання вимірювальної інформації в системах керування.

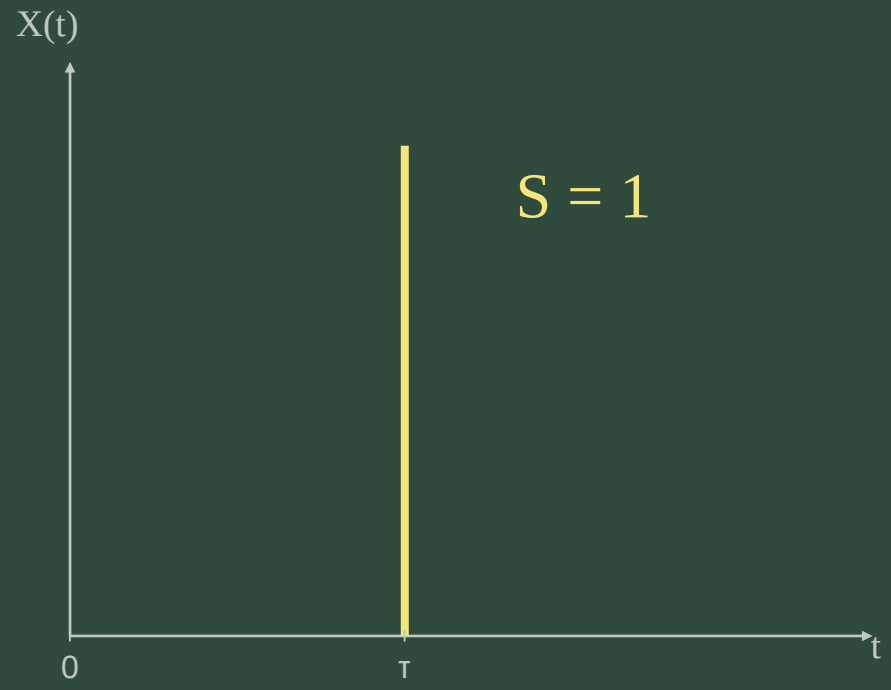
Фізична величина	Діапазони сигналу
Постійний струм	0…5 мА · 0…20 мА · 4…20 мА
Напруга постійного струму	0…+10 В або 0…−10 В

У заданому діапазоні вимірюваної фізичної величини використовують уніфіковані сигнали.

Одиничний імпульс

ДЕЛЬТА-ФУНКЦІЯ ДІРАКА

$$x(t)=\delta(t-\tau)$$



Абстрактний сигнал-імпульс має необмежену амплітуду, нульову тривалість і площу S = 1.

Єдиний інформативний параметр одиничного імпульсу — його положення на осі часу τ.

Властивості одиничного імпульсу

$$\delta(t-\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq \tau \\ \infty & \text{при } t = \tau \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-\tau)dt = 1(t-\tau), \quad 0 < \tau < t$$

Модель дискретизованих сигналів використовується в імпульсних та цифрових схемах.

Послідовність одиничних імпульсів

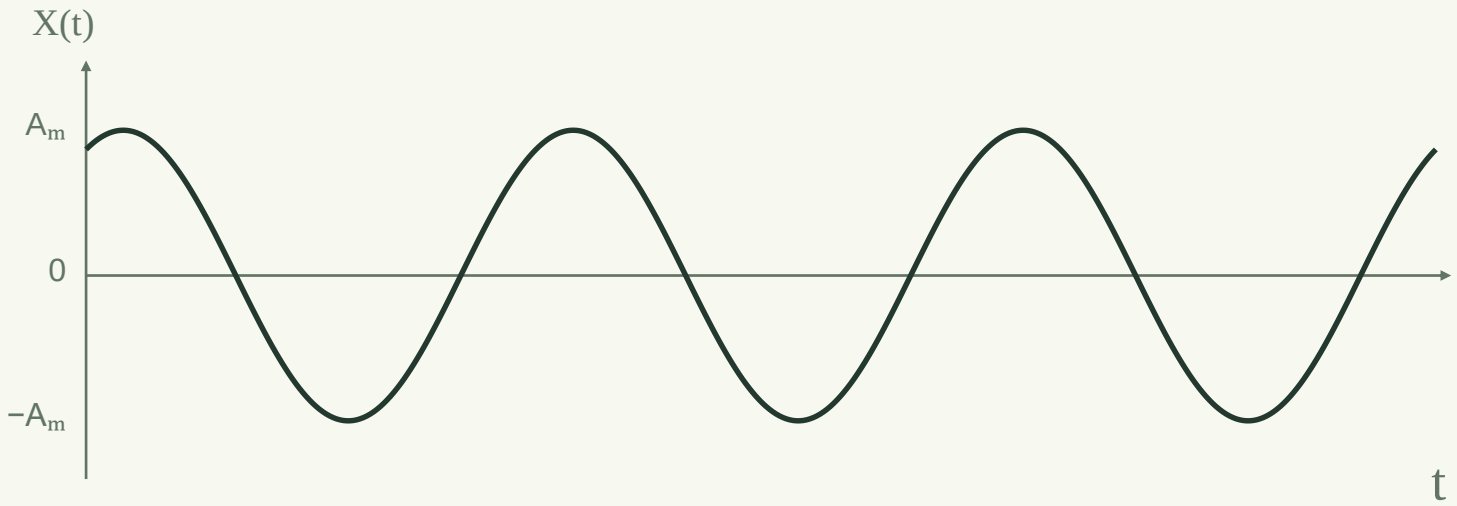
ПЕРІОД T_0

$$x(t)=\sum_{n=0}^{\infty}\delta(t-nT_0)$$



Гармонічний синусоїдний сигнал

$$x(t)=A_m\cos(\omega t+\varphi) = A_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}+\varphi\right)$$



ТРИ ІНФОРМАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ

Амплітуда A_m
Частота 1/T
Початкова фаза φ

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ НЕПЕРЕРВНИХ СИГНАЛІВ

Складні та квазідетерміновані сигнали

Складний сигнал

Для математичного опису такого сигналу важко знайти просту математичну формулу.

Більшість реальних сигналів є складними квазідетермінованими сигналами.

Квазідетермінований сигнал

На детермінований у часі сигнал накладається випадковий процес.

Випадковість зумовлена не лише завадами, а й самим джерелом інформації.

Приклади сфер: техніка зв’язку, інформаційні технології, автоматичне керування рухомими об’єктами, медична діагностика, геологічна та електронна розвідка.

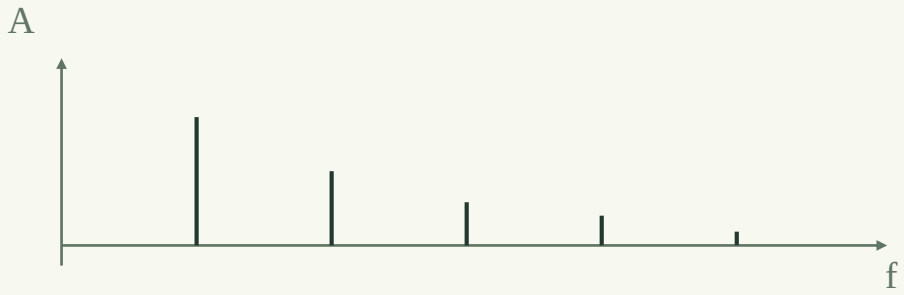
Спектр складного сигналу

ГАРМОНІКИ • АМПЛІТУДНИЙ СПЕКТР • ФАЗОВИЙ СПЕКТР

Будь-який складний періодичний сигнал можна подати рядом Фур’є як суму простих гармонічних коливань. Сукупність цих коливань називається його спектром.

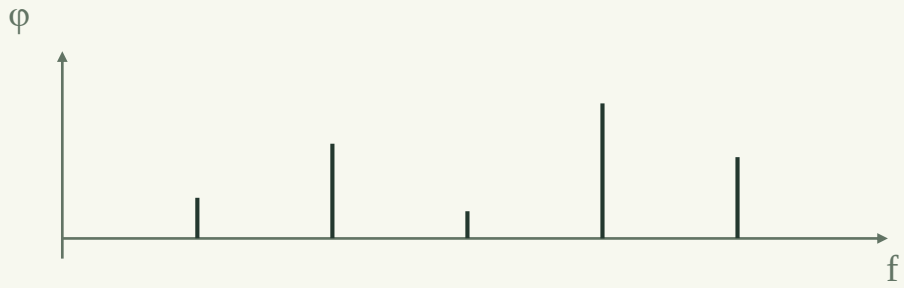
Амплітудно-частотний спектр

Розподіл амплітуд гармонік за частотою.



Фазочастотний спектр

Розподіл початкових фаз гармонік за частотою.



Лінії дискретного спектра мають розмірність амплітуди; неперервний спектр — щільності амплітуд.

Неперервне перетворення Фур’є

ЧАСОВЕ ТА ЧАСТОТНЕ ПОДАННЯ СИГНАЛУ

ПРЯМЕ

$$X(f)=\int x(t)e^{-i2\pi ft}dt$$

ЗВОРОТНЕ

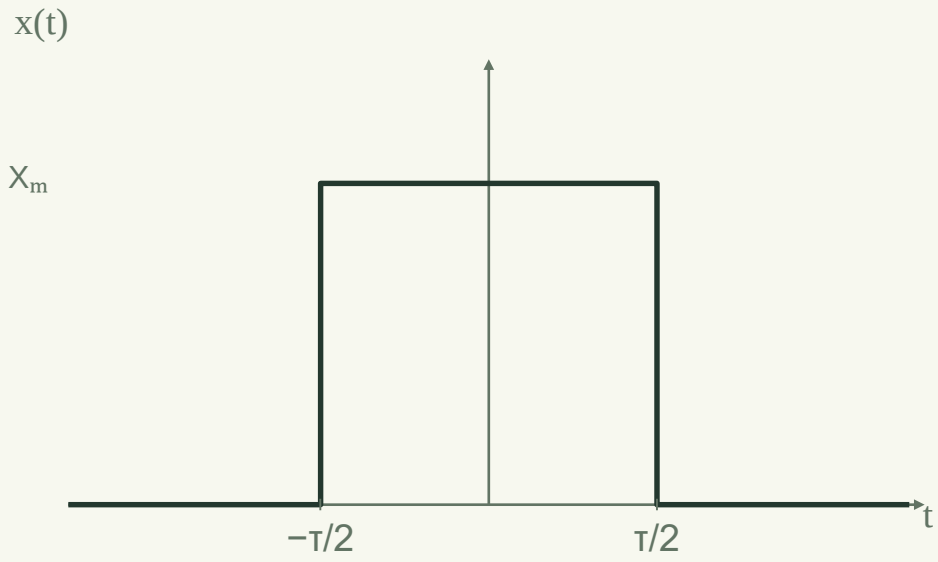
$$x(t)=\int X(f)e^{i2\pi ft}df$$

Одному часовому сигналу відповідає його спектральне подання; зворотне перетворення відновлює x(t).

Прямокутний імпульс та його спектр

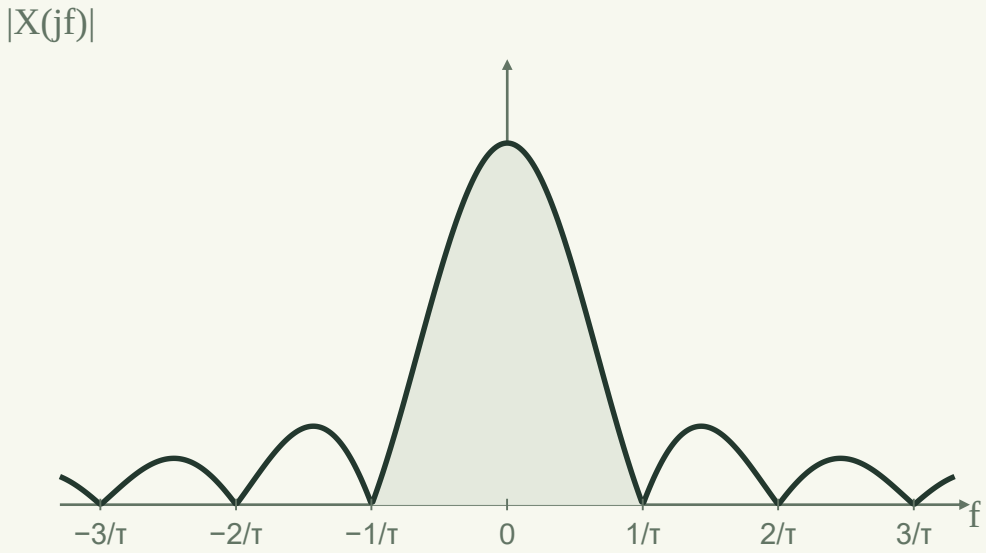
ТРИВАЛІСТЬ ІМПУЛЬСУ ТА ЕФЕКТИВНА ШИРИНА СПЕКТРА

Ідеальний прямокутний імпульс



Тривалість імпульсу — т.

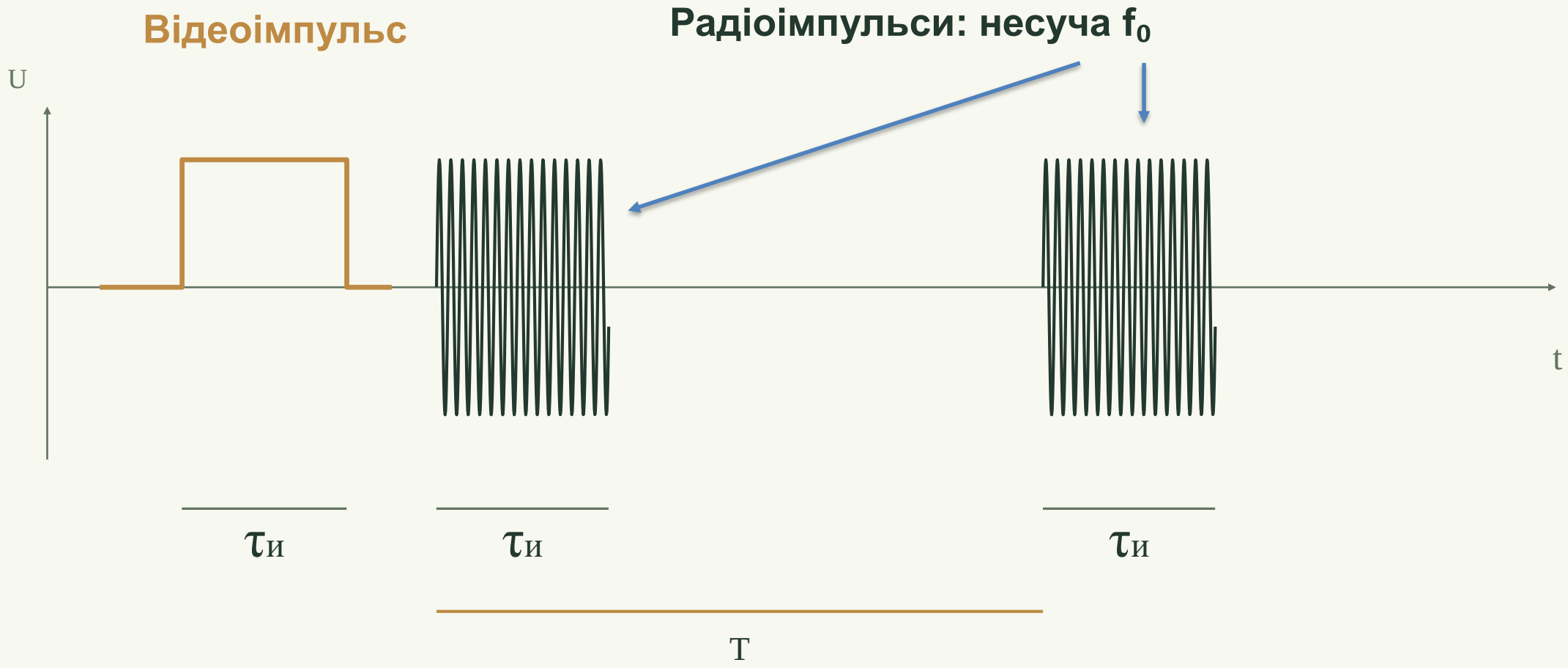
Спектр прямокутного імпульсу



Ефективна ширина спектра (90% енергії)

Відеоімпульс і радіоімпульс

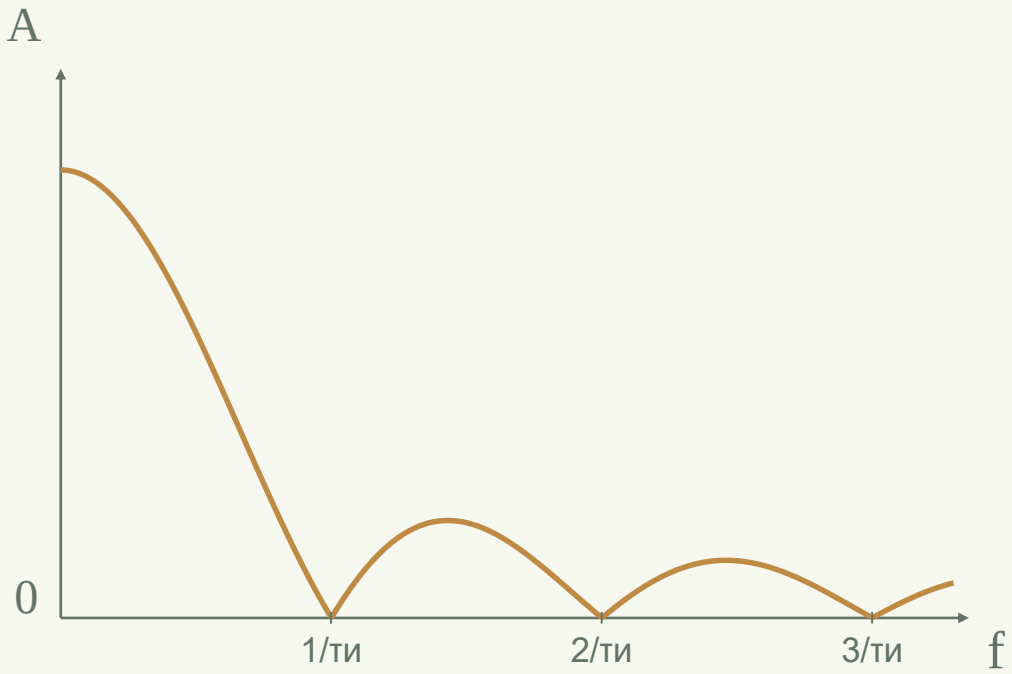
ПОРІВНЯННЯ В ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ



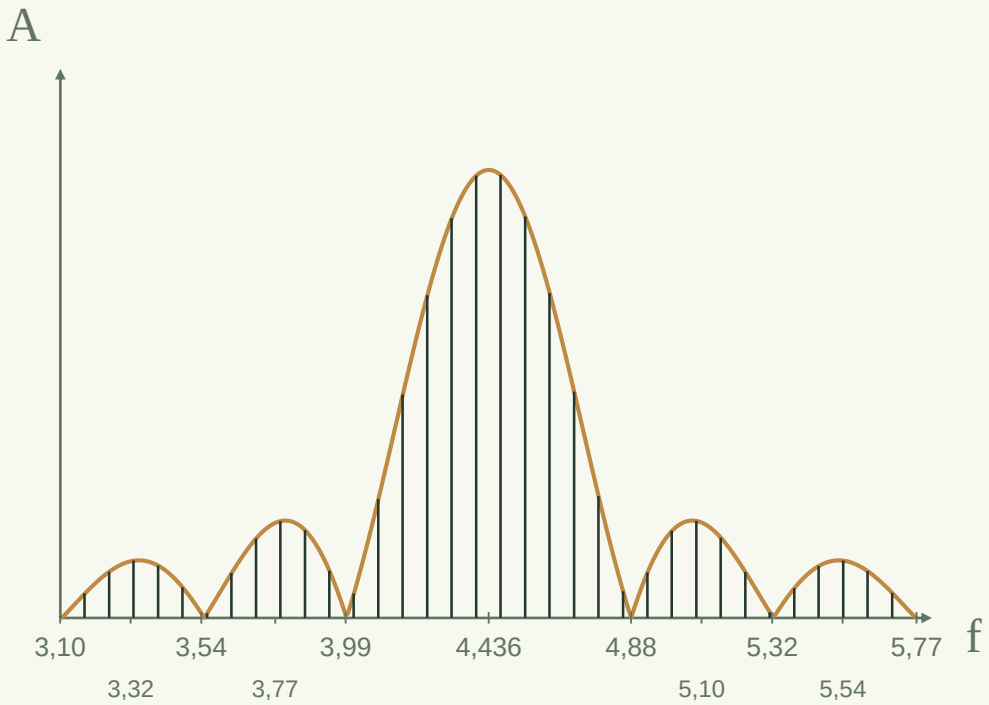
Спектри відео- та радіоімпульсів

ПОРІВНЯННЯ В ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

Спектр відеоімпульсу



Спектр радіоімпульсу



f_0 = 4,436 МГц; Fп — інтервал спектральних ліній

МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛУ

Періодичний імпульсний сигнал

$$x^*(t)=\sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0)\cdot\delta(t-nT_0)\cdot\ s(t-nT_0)$$

T_0	Період імпульсів.
$x(nT_0)$	Функція зміни амплітуди імпульсів.
$\delta(t-nT_0)$	Послідовність елементарних імпульсів; коливання-носій.
$s(t-nT_0)$	Функція, яка задає форму імпульсів.

Модель коротких прямокутних імпульсів

Для коротких прямокутних імпульсів $S(t - nT_0) = 1$. Модель сигналу:

$$x(t)=\sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot \delta(t-nT_0)$$

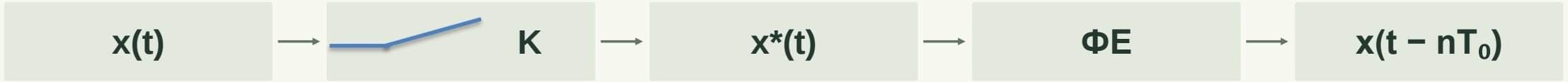
Аналітичний вираз є моделлю сигналу — послідовності коротких прямокутних імпульсів. Модель використовується для математичного опису імпульсних і цифрових систем керування.

Перетворення сигналу імпульсним елементом

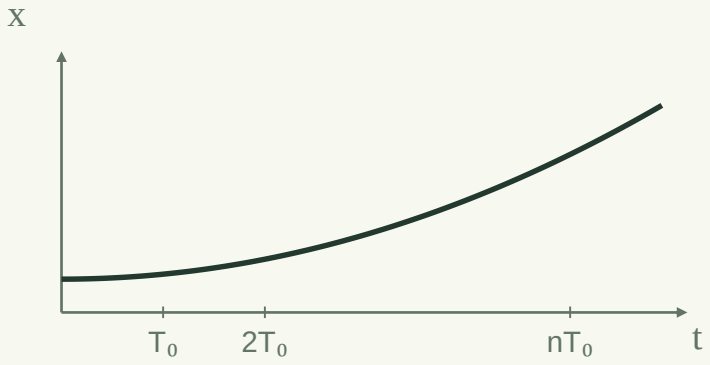
ПЕРЕМИКАЧ **K** , ФОРМУЮЧИЙ ЕЛЕМЕНТ (**ФЕ**)

перемикач K вмикається на дуже короткий час з періодом T_0 і видає імпульси, амплітуда яких змінюється за законом x(t).

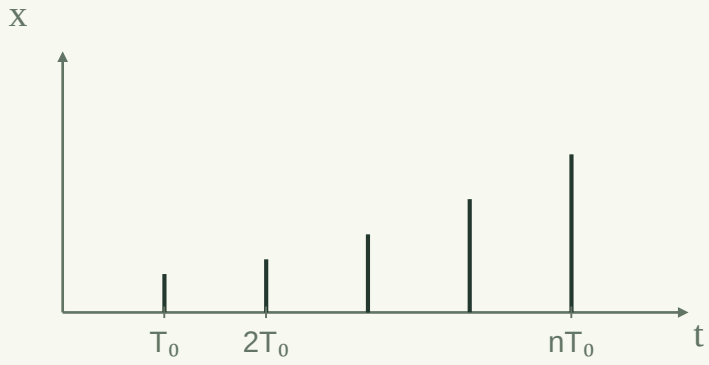
ФЕ формує з модульованих за амплітудою імпульсів імпульси заданої форми: прямокутної, експоненціальної, трикутної тощо.



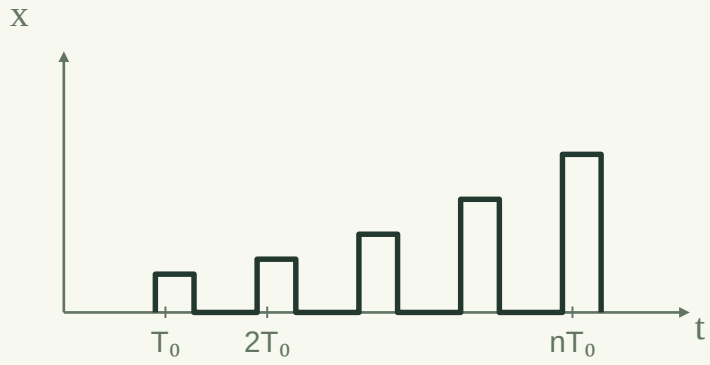
a Вхідний сигнал



b Імпульсні відліки

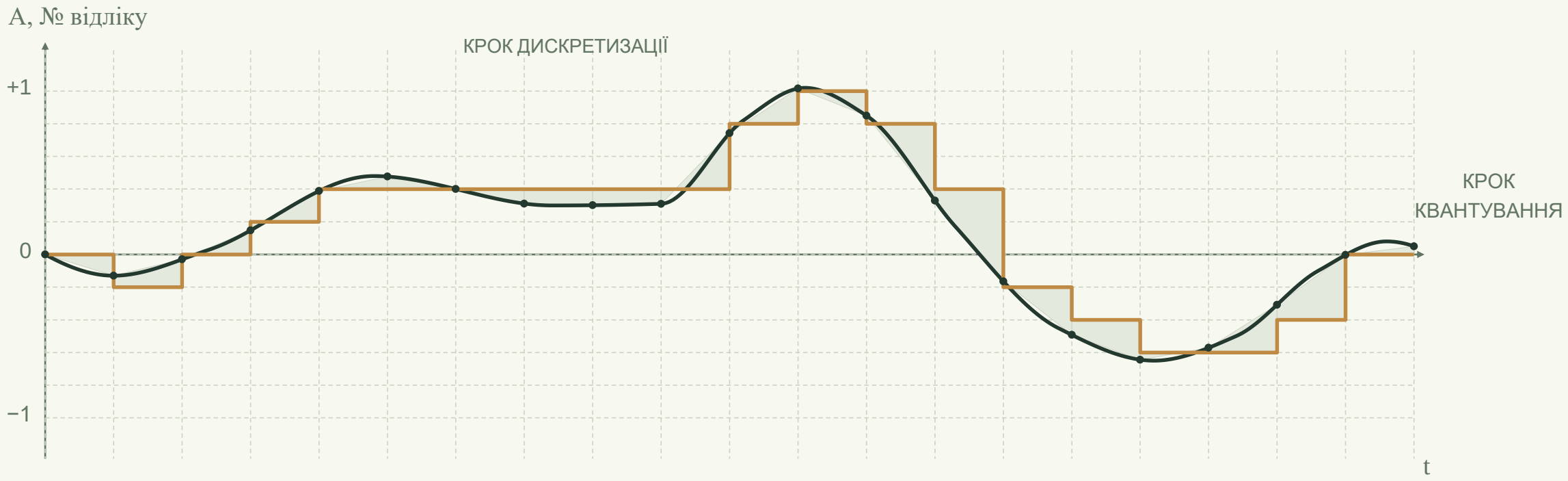


c Сформовані імпульси



Квантування неперервного сигналу за амплітудою

КРОК ДИСКРЕТИЗАЦІЇ • КРОК КВАНТУВАННЯ • ПОХИБКА КВАНТУВАННЯ



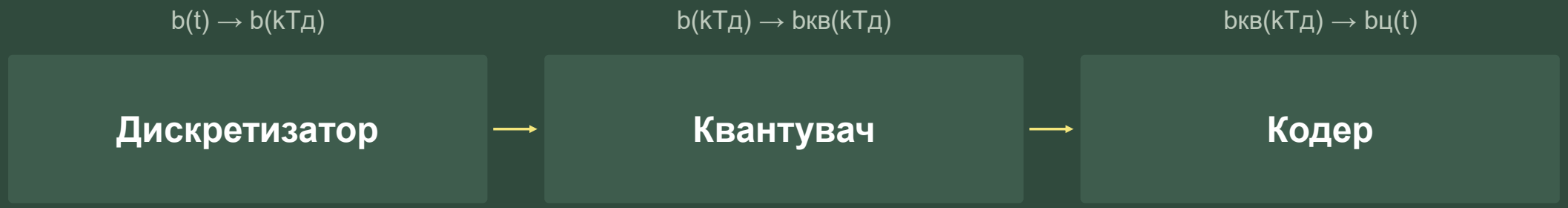
Виміряний сигнал — крива

Округлений сигнал — сходинки

Різниця — похибка квантування

Аналого-цифрове перетворення

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АЦП



Дискретизація

Подання неперервного сигналу відліками.

Квантування

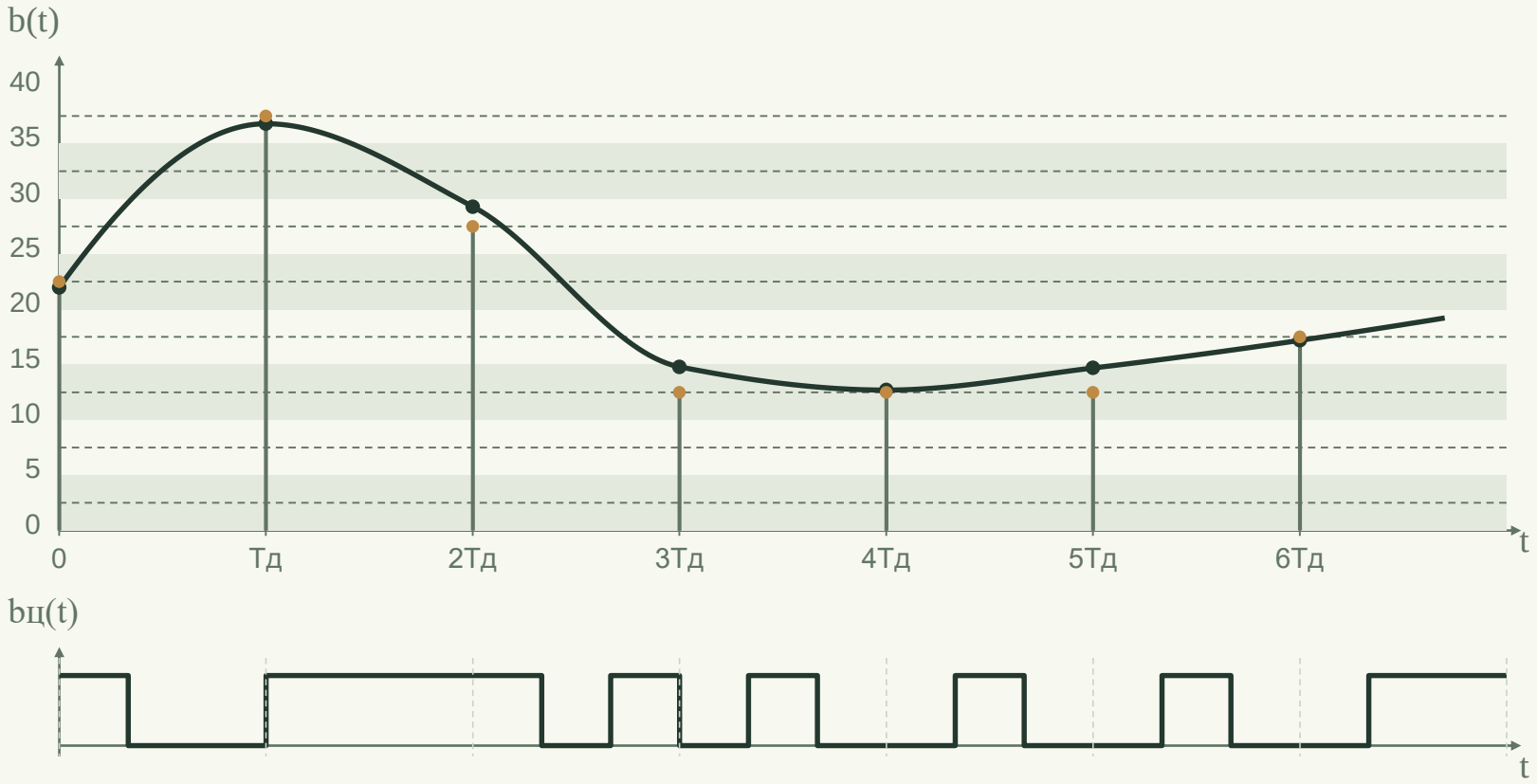
Округлення відліків до найближчих рівнів квантування.

Кодування

Подання квантованих відліків — номерів рівнів — кодовими комбінаціями.

Від аналогової кривої до двійкових комбінацій

ВІДЛІКИ, РІВНІ ТА ТРИБІТОВІ КОДИ



Рівень	Код
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Тб — тривалість біта

Умова відновлення неперервного сигналу

АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Fmax — максимальна частота спектра аналогового (неперервного) сигналу. Для можливості повного відновлення сигналу:

$$T_д \leq \frac{1}{2F_{max}}$$

або

$$f_д \geq 2F_{max}$$

Тд

Інтервал дискретизації

fд

Частота дискретизації (Найквіст)

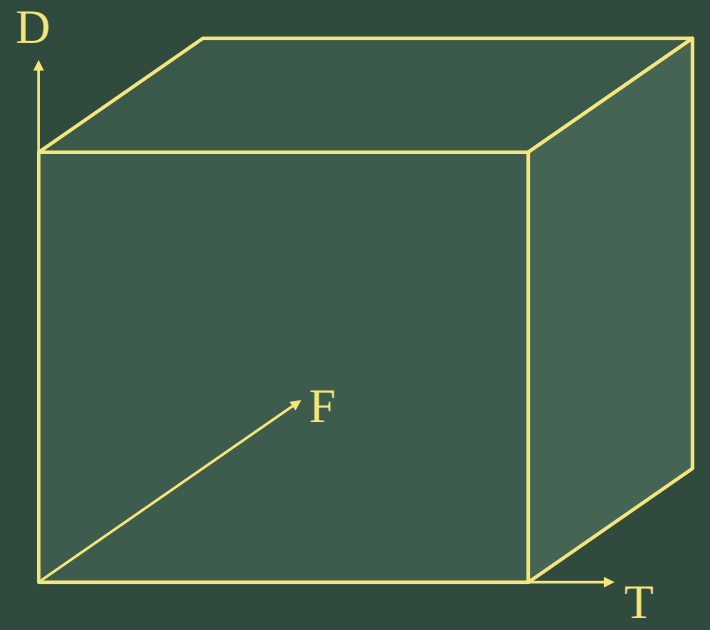
Основні параметри та об’єм сигналу

ТРИВАЛІСТЬ TC • СМУГА ЧАСТОТ FC • ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН DC

Динамічний діапазон Dc — енергетична міра сигналу: логарифм відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності завад на вході лінії зв’язку.

$$D_c = \log \frac{P_c}{P_з}$$

$$V_c = T_c F_c D_c$$



Об’єм сигналу — узагальнена характеристика носія інформації. Геометрична модель — паралелепіпед T, F, D.

Параметри каналу та узгодження із сигналом

ЧАС РОБОТИ TK • СМУГА ПРОПУСКАННЯ FK • ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН DK

Канал зв’язку характеризують часом роботи, смугою частот пропускання і динамічним діапазоном — перевищенням середньої потужності сигналу над середньою потужністю завад на виході каналу.

$$D_к = \log \frac{P_с}{P_з}$$

$$V_к = T_к F_к D_к$$

Добуток параметрів називають об’ємом (ємністю) каналу зв’язку.

$$T_к \geq T_с; \quad F_к \geq F_с; \quad D_к \geq D_с$$

Об’єм сигналу та резерв ємності каналу

МОЖЛИВІСТЬ УЗГОДЖЕННЯ В ПРОСТОРІ T, F, D

Повідомлення має перетворюватися на сигнал так, щоб його об’єм у просторі T, F, D відповідав об’єму каналу. У тексті лекції це описано як збіг часу, смуги частот і динамічних діапазонів.

Якщо об’єм сигналу менший за об’єм каналу або дорівнює йому, у джерелі зазначено можливість перетворення сигналу для виконання умов узгодження.

$$V_к \geq V_с$$

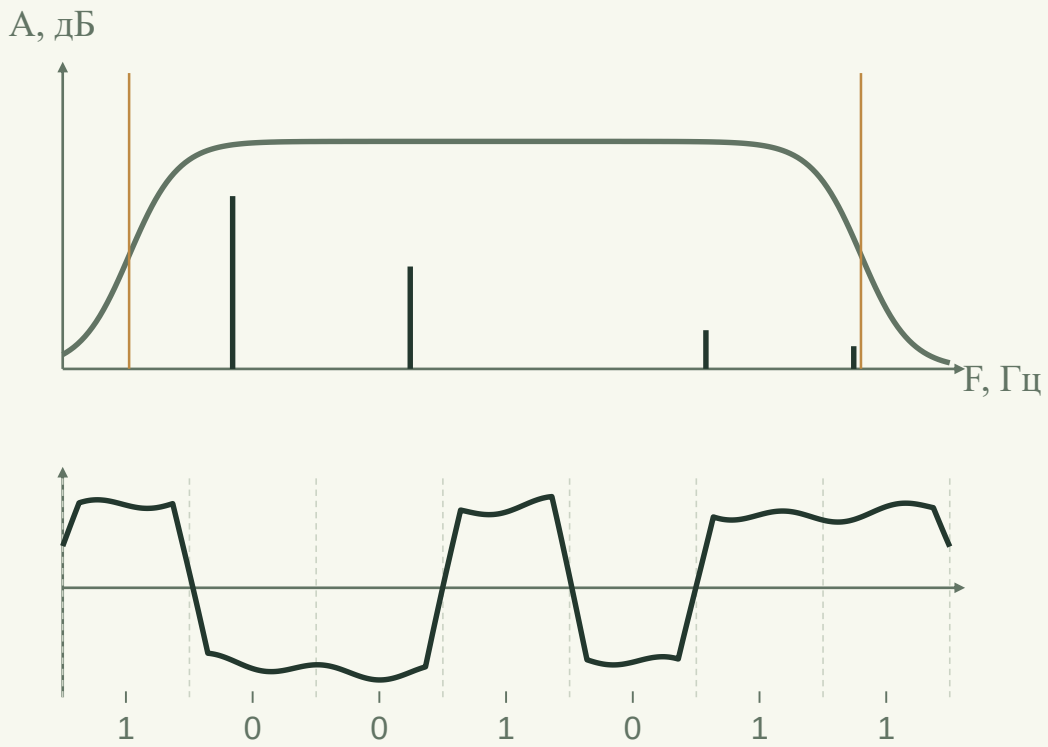
$$r_к = \frac{V_к}{V_с}$$

Резерв ємності каналу rк характеризує можливості підвищення надійності каналу зв’язку.

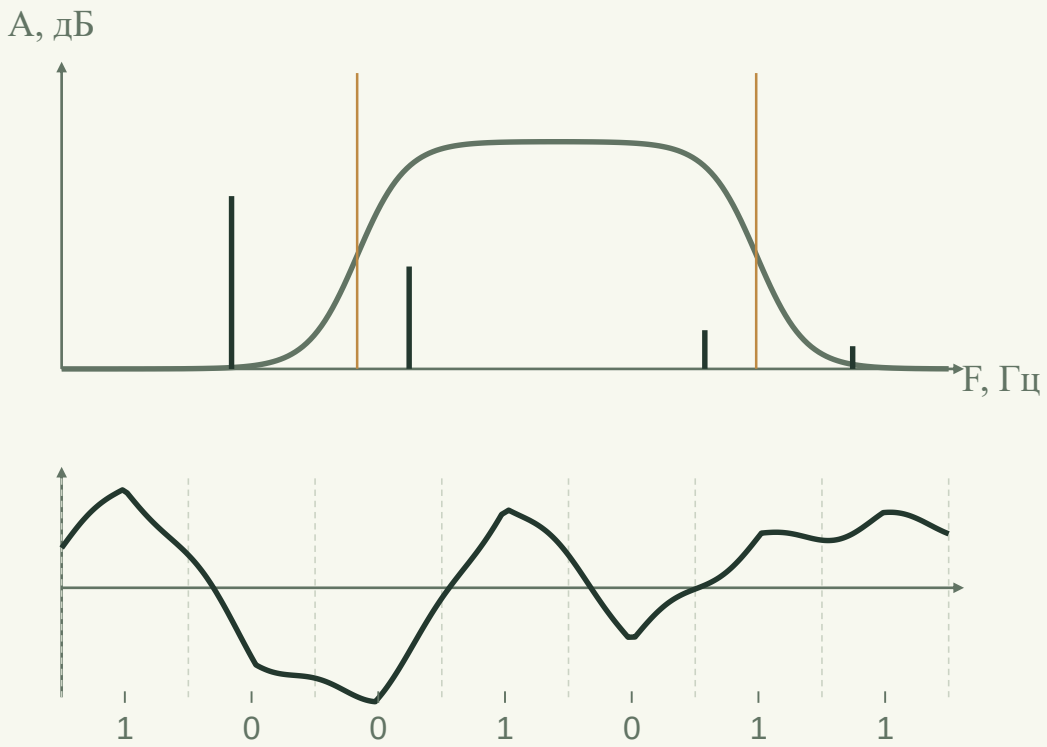
Смуга пропускання та спектр сигналу

ДВА СПІВВІДНОШЕННЯ СПЕКТРА І СМУГИ ЛІНІЇ

а Гармоніки в смузі пропускання

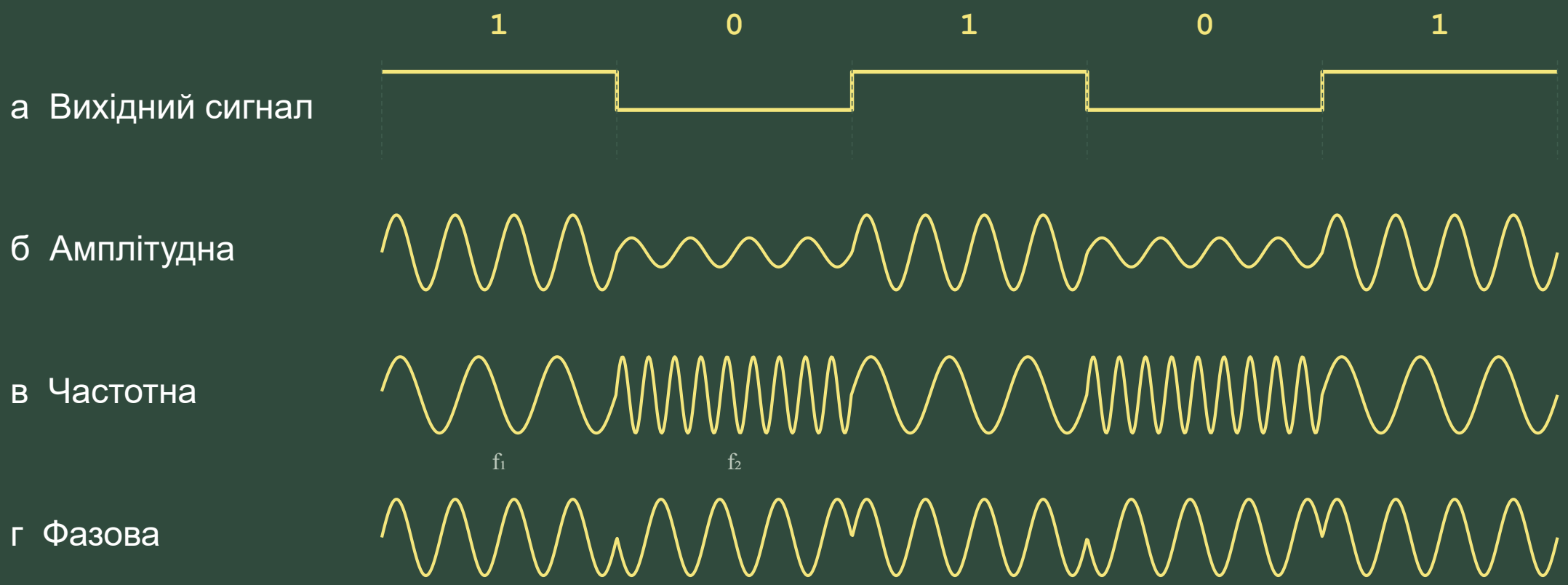


б Частина гармонік поза смугою



Амплітудна, частотна та фазова модуляція

РИСУНОК А–Г • ПОЧАТКОВА ПОСЛІДОВНІСТЬ 1 0 1 0 1



Класифікація способів кодування сигналів



Основні вимоги до лінійного кодування

ПЕРЕДАВАННЯ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ У КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

01 Мінімальна ширина спектра сигналу.

02 Синхронізація передавача і приймача.

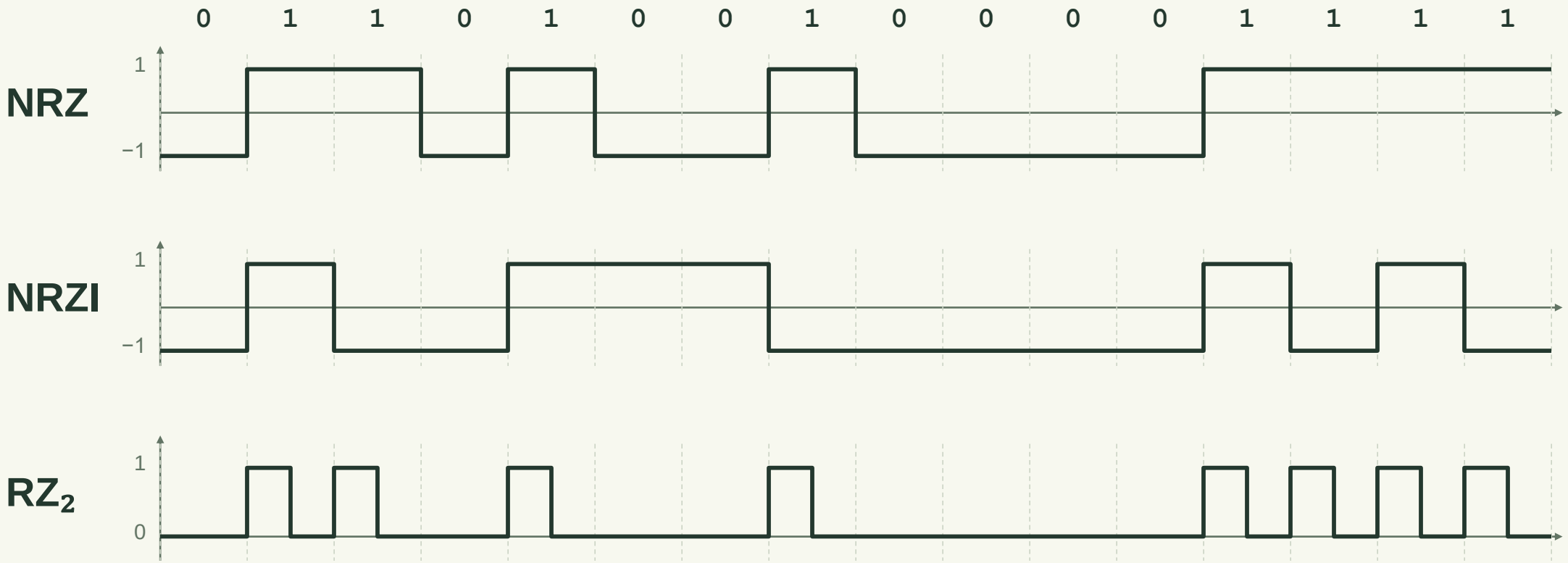
03 Низький рівень помилок.

04 Енергоефективність.

05 Мінімізація постійної складової сигналу.

Методи цифрового кодування: NRZ, NRZI, RZ

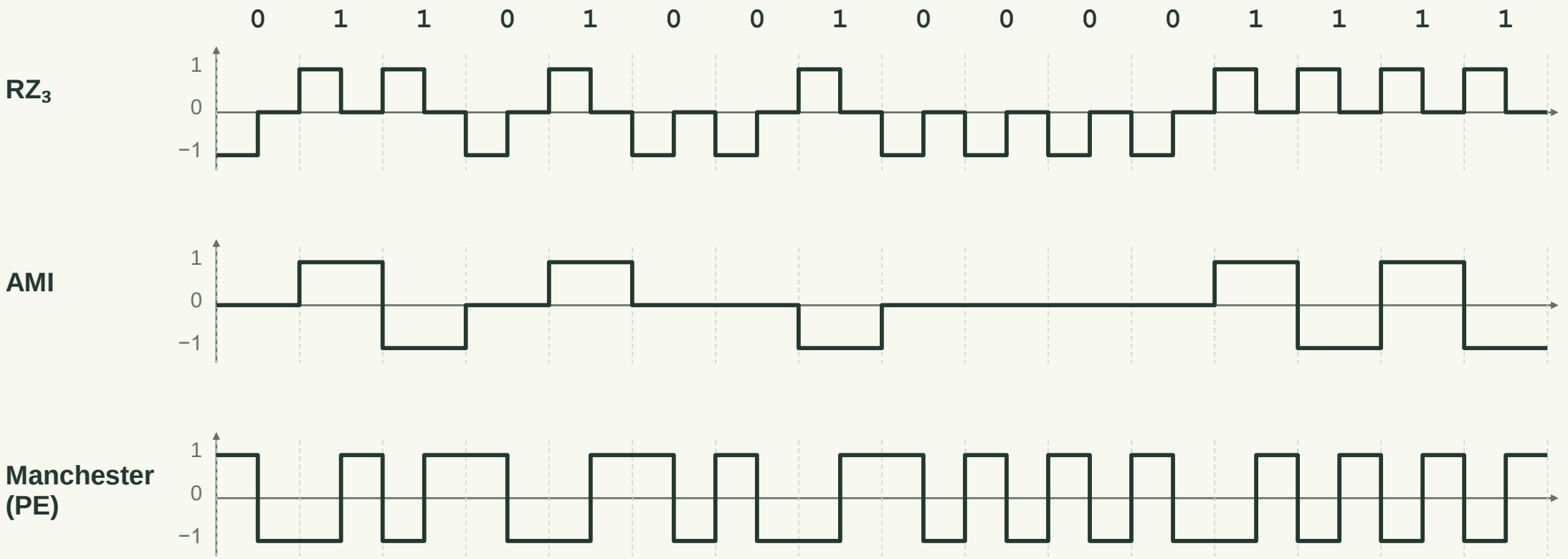
ОДНАКОВА ПОСЛІДОВНІСТЬ ІЗ 16 БІТІВ



Для NRZI рівень змінюється на «1»; у двохрівневому RZ імпульс повертається до нульового рівня.

Методи цифрового кодування: RZ3, AMI, Manchester

ТІ САМІ ЧАСОВІ ІНТЕРВАЛИ



Позначення RZ_2 та RZ_3 відтворюють дво- і трирівневі варіанти.

NRZ — без повернення до нуля

NON-RETURN TO ZERO • NRZ-L (LEVEL) І NRZ-I (INVERT)

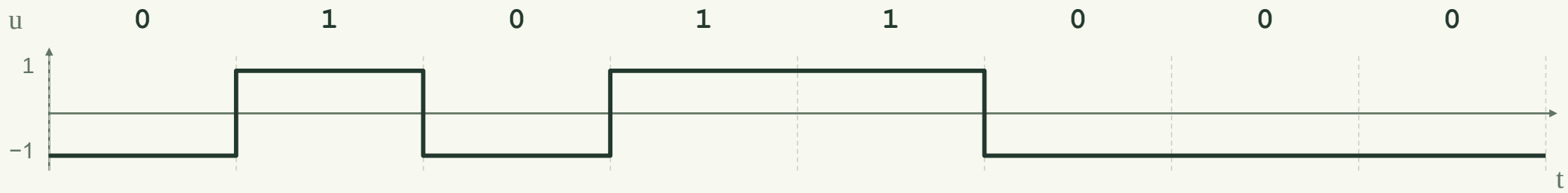
Біт передається постійним рівнем напруги протягом усього інтервалу біта.

Переваги

Простота реалізації.
Мала смуга частот.

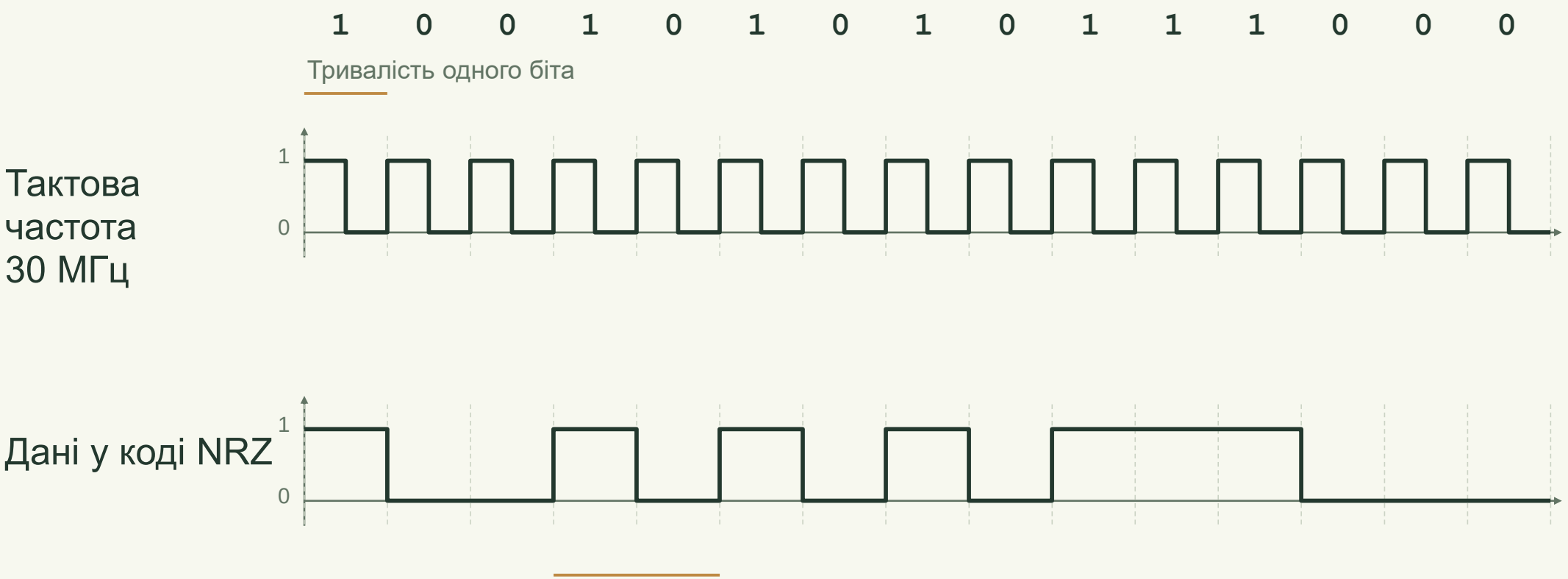
Недоліки

Синхронізація при довгих серіях однакових бітів. Постійна складова.



NRZ: тактова частота та тривалість біта

РИСУНОК 2.34 • ЧИСЛОВІ ЗНАЧЕННЯ І ПОСЛІДОВНІСТЬ ДЖЕРЕЛА

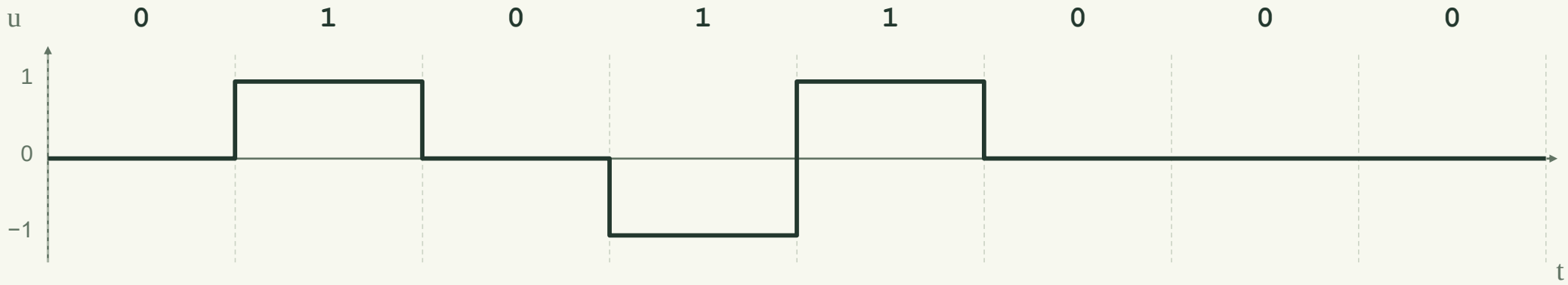


Середній період сигналу на шині (на рисунку відповідає 15 МГц).

AMI — почергова інверсія маркерів

ALTERNATE MARK INVERSION • ТРИ РІВНІ: +U, 0, −U

Логічний «0» передається нульовим рівнем. Логічна «1» — імпульсами почергово позитивної та негативної полярності, що виключає постійну складову в сигналі.



Хороша синхронізація на серіях одиниць. Порівняно проста реалізація.

Довгі послідовності нулів ведуть до втрати синхронізації. Для вирішення цієї проблеми використовують коди з заміщенням нулів (високощільні коди), такі як **HDB3**, де блоки з чотирьох нулів замінюються спеціальними комбінаціями з порушенням полярності (v-імпульсами).

Манчестерське кодування

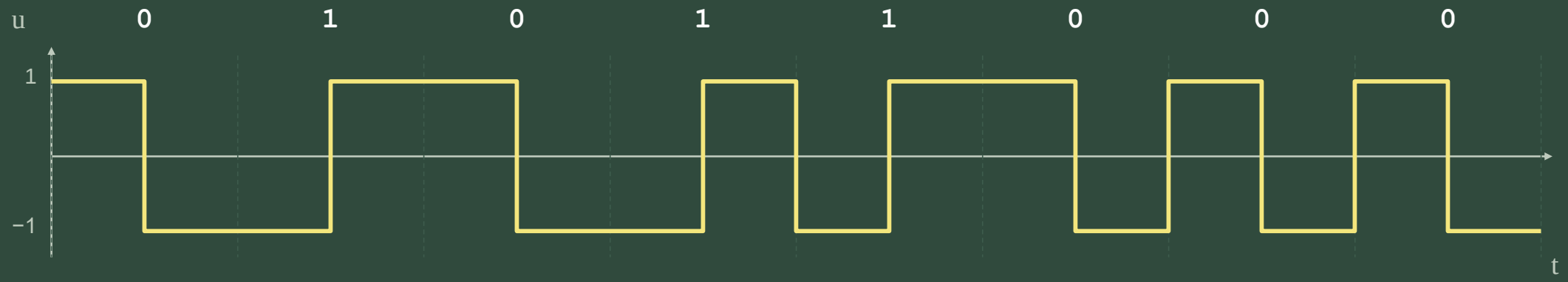
ІНФОРМАЦІЯ КОДУЄТЬСЯ ПЕРЕХОДОМ У СЕРЕДИНІ ТАКТУ

1 → низький / високий

У середині такту рівень зростає.

0 → високий / низький

У середині такту рівень знижується.

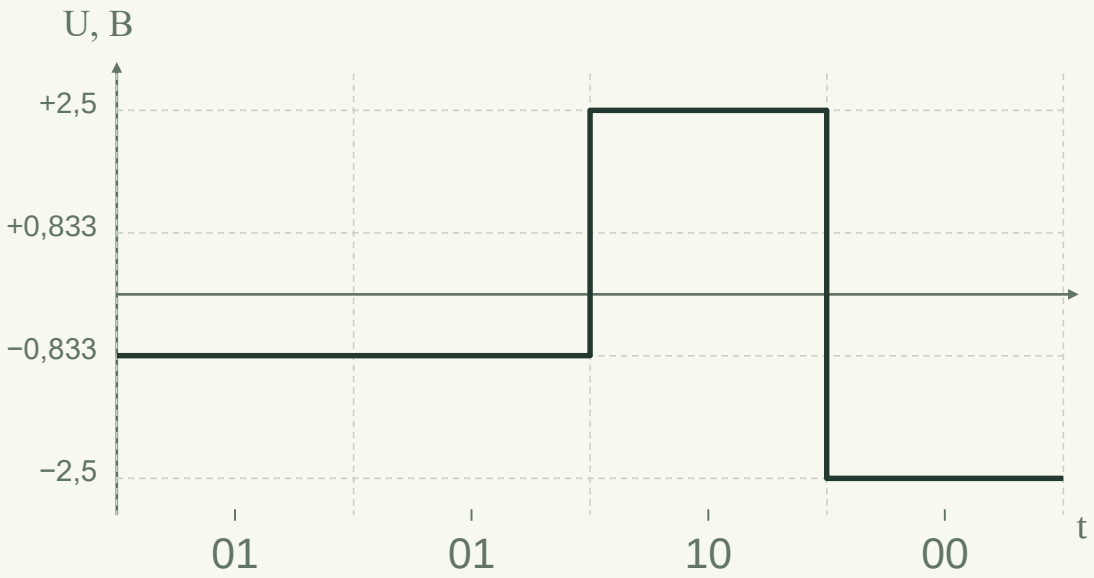


На початку такту за потреби відбувається службовий перепад. Сигнал змінюється принаймні раз за такт, тому код має високі самосинхронізуючі властивості.

2B1Q — два біти, один чотирирівневий символ

КОЖНІЙ ПАРІ БІТІВ ВІДПОВІДАЄ ОДИН РІВЕНЬ ПОТЕНЦІАЛУ

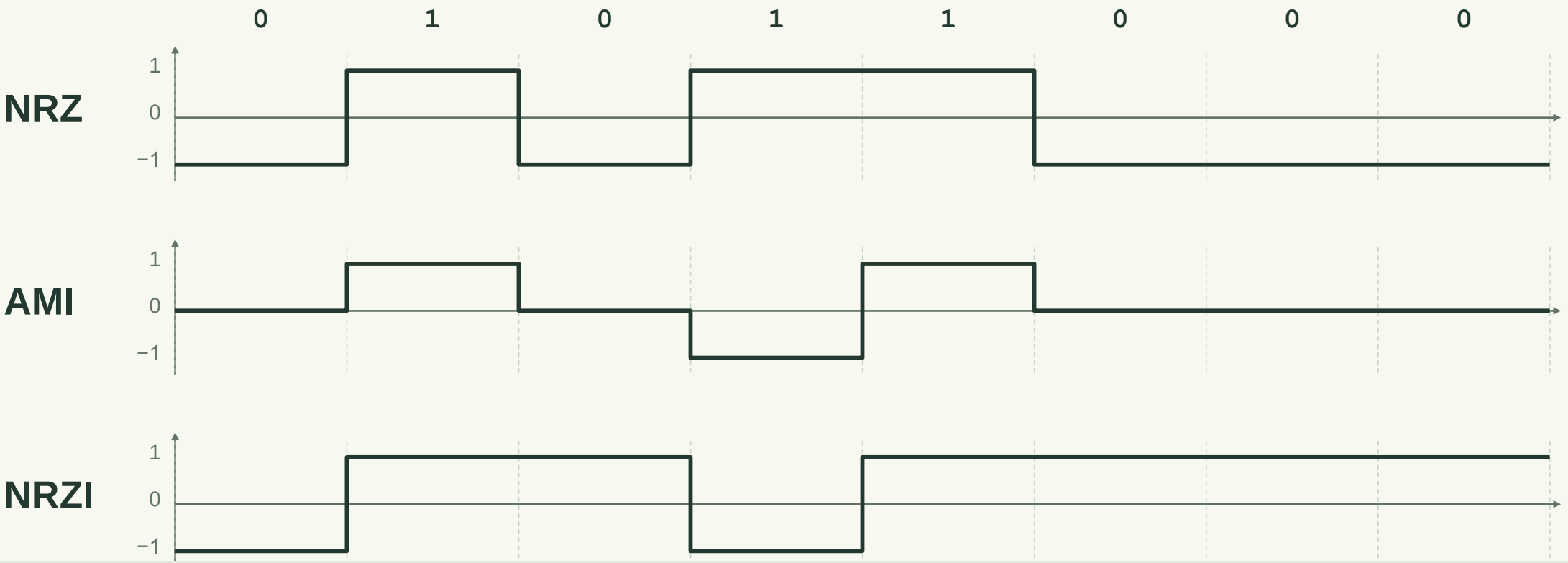
Пара бітів	Рівень потенціалу
00	−2,5 В
01	−0,833 В
11	+0,833 В
10	+2,5 В



Потрібні додаткові заходи проти довгих послідовностей однакових пар. При випадковому чергуванні бітів спектр удвічі вужчий, ніж у NRZ; за допомогою 2B1Q дані можна передавати вдвічі швидше, ніж AMI чи NRZ.

Порівняння схем: NRZ, AMI та NRZI

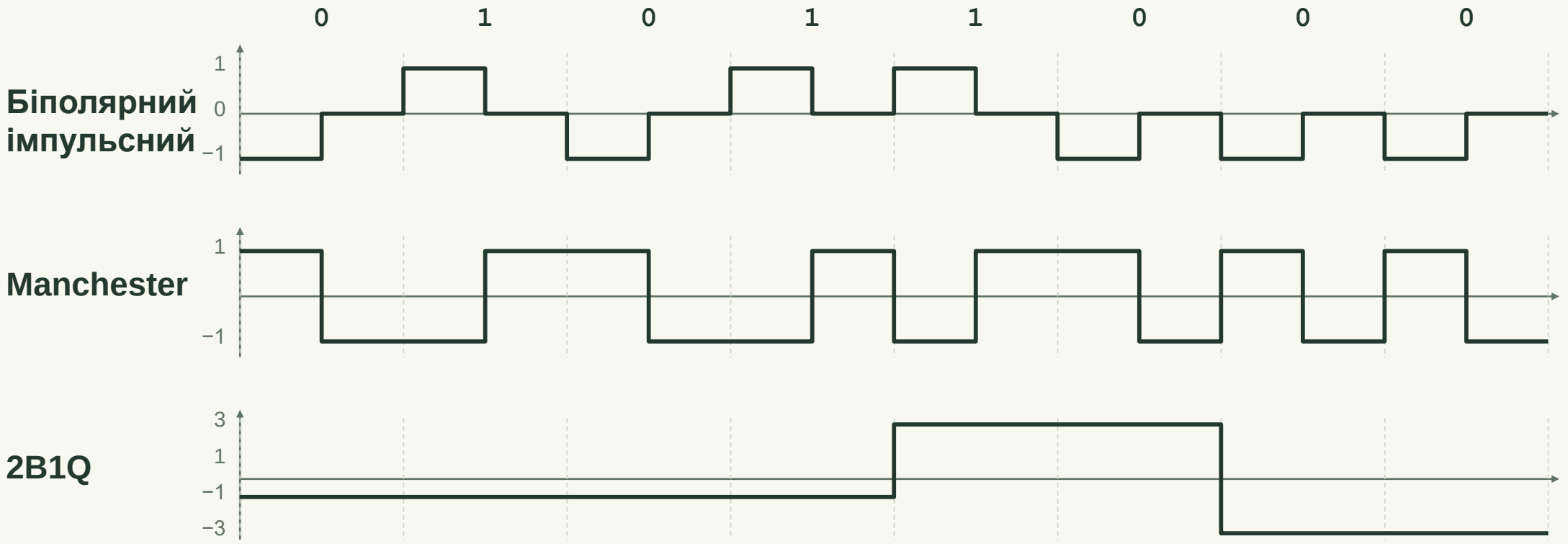
ПОСЛІДОВНІСТЬ 0 1 0 1 1 0 0 0



Усі сигнали показано в однаковому часовому масштабі. Початковий рівень NRZI — низький.

Порівняння схем: імпульсний, Manchester, 2B1Q

ПРОДОВЖЕННЯ РИСУНКА 2.16 • НОРМОВАНІ РІВНІ ОРИГІНАЛЬНОЇ СХЕМИ

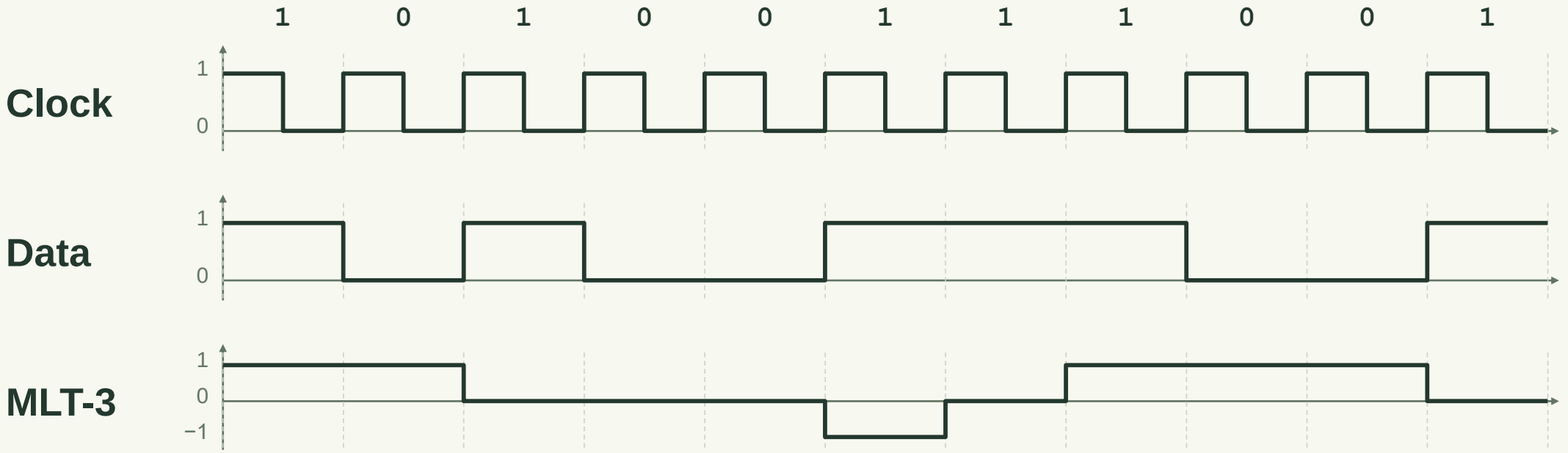


Manchester має два рівні; біполярний імпульсний — три. У лекції смугу Manchester зазначено вужчою.

MLT-3 — багаторівнева передача

MULTI LEVEL TRANSMISSION • ЦИКЛІЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ −U, 0, +U

Одиниці відповідає перехід з одного рівня сигналу на наступний. Так само, як у NRZI, під час передавання «нуля» сигнал не змінюється.



Для MLT-3 одиниця змінює рівень; нуль зберігає попередній рівень сигналу.

MLT-3: чотири переходи на один цикл

СМУГА ЧАСТОТ І ЗАСТОСУВАННЯ

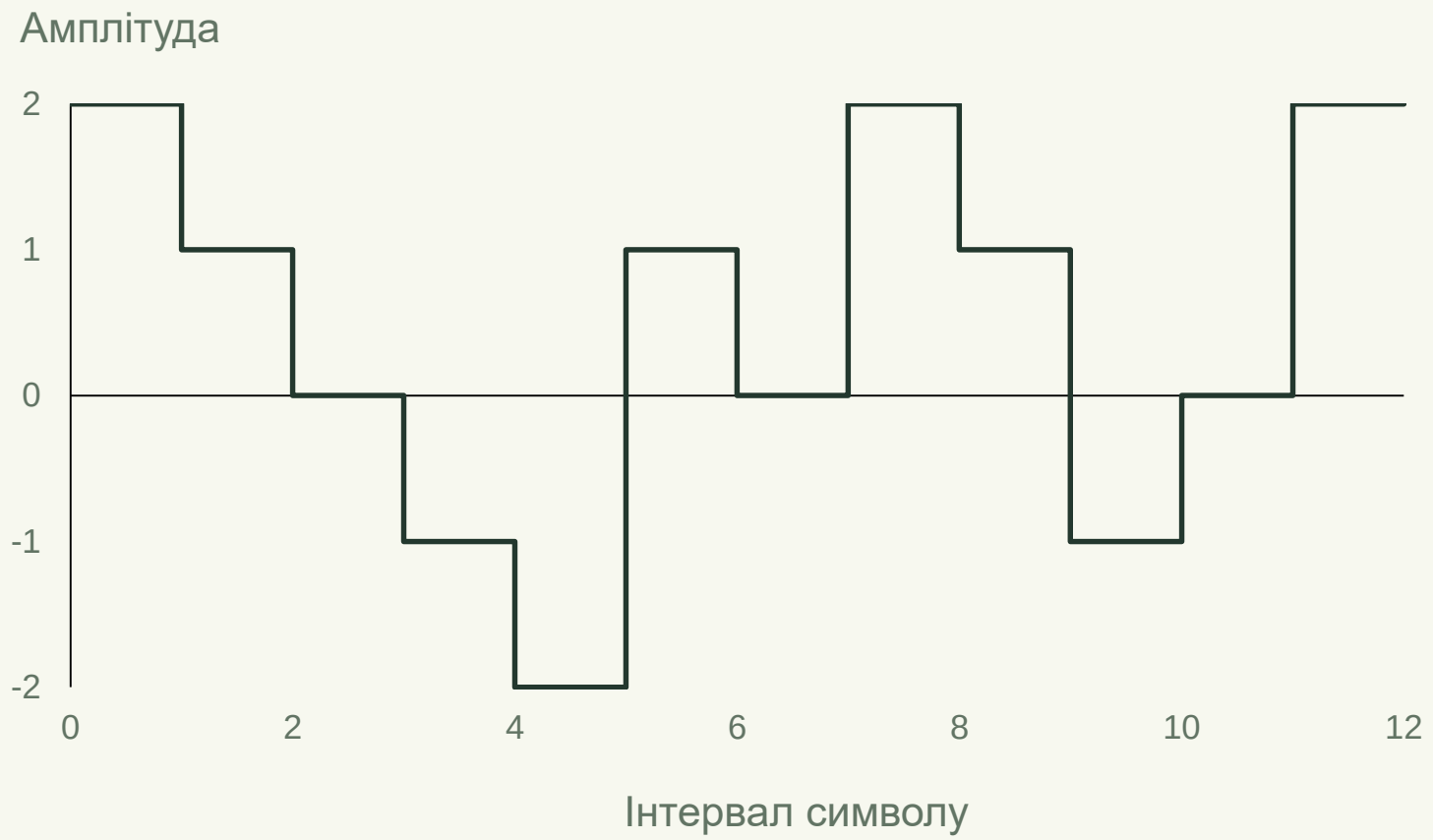


За найбільш частого перемикання рівнів — довгої послідовності одиниць — для завершення циклу необхідно чотири переходи. Це дозволяє вчетверо знизити частоту несучої відносно тактової частоти.

Середовище передавання — мідні проводи. У лекції наведено CDDI та Fast Ethernet 100BASE-TX.

PAM-5: п’ять рівнів амплітуди

PULSE AMPLITUDE MODULATION • ЧАСОВИЙ ГРАФІК



−2 −1 0 +1 +2

П’ятирівнева амплітудно-імпульсна модуляція використовує п’ять різних рівнів для передавання даних.

Нульовий рівень — додатковий порівняно з чотирирівневим 2B1Q.

PAM-5: можливості та вимоги

ПРИКЛАД ІЗ ЛЕКЦІЇ: 1000BASE-T (GIGABIT ETHERNET)

PAM-5 використовується для високошвидкісних мереж, зокрема 1000BASE-T, і дозволяє передавати дані по крученій парі зі швидкістю 1 Гбіт/с.

Переваги

Підвищення швидкості: більше інформації в імпульсі «2 біти + додаткові біти для виправлення помилок».

Ефективніше використання смуги пропускання.

Недоліки

Складна обробка сигналу.

Необхідність фільтрації шуму.

4B/5B — блокове кодування

ПЕРЕТВОРЕННЯ 4-БІТОВИХ ГРУП ДАНИХ У 5-БІТОВІ КОДИ

4 біти даних → **Кодова таблиця** → **5 біт коду**

Переваги

Покращення синхронізації.
Обмеження довжини серій нулів.
Підвищення надійності передачі.

25%
НАДЛИШКОВІСТЬ

Таблиця двійкових послідовностей 4B/5B

ТАБЛИЦЯ • ПЕРЕХІД ВІД 4 ДО 5 БІТІВ

Число	Двійковий код	Код 4B/5B
0	0000	11110
1	0001	01001
2	0010	10100
3	0011	10101
4	0100	01010
5	0101	01011
6	0110	01110
7	0111	01111

Число	Двійковий код	Код 4B/5B
8	1000	10010
9	1001	10011
10	1010	10110
11	1011	10111
12	1100	11010
13	1101	11011
14	1110	11100
15	1111	11101

Висновки

ВІД ФІЗИЧНОГО НОСІЯ ДО ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕДАЧІ В КАНАЛІ

Сигнал як носій

Передавання інформації здійснюється за допомогою переносників інформації; матеріальну основу складають сигнали.

Інформаційні параметри

Амплітуда, частота або фаза коливань можуть переносити інформацію.

Спектральне подання

Складний періодичний сигнал розкладається на гармоніки рядом Фур’є; їх сукупність — спектр.

АЦП

Основні операції: дискретизація, квантування та кодування.

Відновлення сигналу

Умова повного відновлення аналогового сигналу: $f_д \geq 2F_{max}$.

Комбінування методів

Кодування зменшує ширину спектра, забезпечує синхронізацію та покращує завадостійкість; У сучасних мережах використовуються **комбіновані методи кодування** (наприклад 4B/5B + MLT-3 або PAM-5).