

Практична робота

Розрахунок пропускної здатності каналу для передачі сигналу ЕКГ

Мета роботи: Розрахувати мінімальну пропускну здатність каналу зв'язку, необхідну для реального часу передачі цифрового сигналу ЕКГ у двох сценаріях – постійний моніторинг та клінічна телеметрія. Додатково: врахувати мережеві заголовки (IP/UDP/RTP), пакетизацію, компресію та запас на надійність.

Теоретичні відомості

Електрокардіографічний сигнал (ЕКГ) є одним із найважливіших біомедичних сигналів, що використовується для дистанційного моніторингу функціонального стану серцево-судинної системи пацієнта.

У телемедичних системах передача ЕКГ здійснюється в цифровій формі через канали зв'язку різного типу:

- дротові (Ethernet);
- бездротові локальні мережі (Wi-Fi);
- мобільні мережі (3G, 4G, LTE, 5G);
- енергоощадні IoT-мережі (NB-IoT, LoRaWAN).

Якість передачі ЕКГ визначається такими параметрами:

Пропускна здатність каналу – максимальний обсяг інформації, що може бути переданий за одиницю часу.

Затримка передачі – час від моменту формування сигналу до його отримання.

Джитер – варіація затримки між пакетами.

Втрати пакетів – частка даних, що не дійшла до приймача.

Для медичних систем критично важливо забезпечити передачу сигналу без значних спотворень і затримок.

Перед передачею аналоговий сигнал ЕКГ проходить процеси підсилення; фільтрацію; дискретизацію; квантування; пакетизацію.

Частота дискретизації діагностичної ЕКГ:

- ~ 250 Гц – базовий моніторинг;
- ~ 500 Гц – клінічна телеметрія;
- ~ 1000 Гц – високоточний аналіз.

Розрядність визначає точність цифрового представлення сигналу.

Типові значення:

- ~ 10 біт;
- ~ 12 біт;
- ~ 16 біт.

На практиці навіть 12-бітні дані часто упаковуються у 16-бітні слова для зручності передачі.

Передача даних здійснюється пакетами. Кожен пакет складається з:

Корисного сигналу – власне відліків ЕКГ.

Службових заголовків (headers):

- ~ IP – 20 байт,
- ~ UDP – 8 байт,
- ~ RTP – 12 байт.

Загальний службовий обсяг: 40 байт. При малих пакетах службова інформація може складати значну частину трафіку.

Для зменшення навантаження використовують компресію:

- ~ без втрат;
- ~ з мінімальними втратами.

Типові коефіцієнти:

- ~ 2:1,
- ~ 4:1,
- ~ 8:1.

Однак надмірне стиснення може призвести до втрати діагностично важливої інформації.

Формули для розрахунку

Сирий бітрейт (без заголовків):

$$R_{\text{raw}} = f_s \times N_{\text{ch}} \times b_{\text{sample}} \text{ [біт/с]},$$

де b_{sample} – біт на відлік (реально пакуємо у 16 біт → використовуємо 16).

Сирий байтрейт:

$$B_{\text{raw}} = R_{\text{raw}}/8 \text{ [байт/с]}.$$

Пакетна модель (врахування заголовків).

Кількість пакетів в секунду:

$$P = f_s/N_{\text{s/pkt}}.$$

Розмір корисної частини пакету (байти):

$$S_{\text{payload}} = N_{\text{s/pkt}} \times (b_{\text{sample}}/8) \times N_{\text{ch}}.$$

Повний розмір пакету (байти):

$$S_{\text{pkt}} = S_{\text{payload}} + S_{\text{hdr}},$$

де $S_{\text{hdr}} = 40$ байт.

Байт/с з урахуванням пакетів:

$$B_{\text{with_hdr}} = P \times S_{\text{pkt}}.$$

Біт/с з заголовками:

$$R_{\text{with_hdr}} = B_{\text{with_hdr}} \times 8.$$

Врахування оверхеду та запасу:

$$R_{\text{final}} = R_{\text{with_hdr}} \times (1 + O_{\text{app}}) \times (1 + M),$$

де $O_{\text{app}} = 10\%$ - оверхед, $M = 20\%$ - запас.

При компресії (коефіцієнт стиснення C , наприклад $2 \rightarrow 2:1$):

$$R_{\text{compressed}} = R_{\text{with_hdr}} / C.$$

(потім також множимо на оверхед і запас).

Сериалізація (час передачі пакета по каналу):

$$D = (S_{\text{pkt}} \times 8) / R_{\text{final}}$$

де R_{final} – пропускна здатність каналу (біт/с).

Припустити коефіцієнт стиснення (4:1) і повторити розрахунок.

Вхідні дані

Сценарій А (Постійний моніторинг – 1 відведення).

Частота дискретизації $f_s = 250$ Гц.

Розрядність ADC = 12 біт (пакуються як 16 біт/відлік = 2 байти/відлік).

Кількість каналів $N_{ch} = 1$.

Вибір пакету: $N_{s/pkt} = 50$ відліків в одному мережевому пакеті.

Мережеві заголовки (IP+UDP+RTP) $\approx 20 + 8 + 12 = 40$ байт на пакет.

Додатковий протокольний/аплікативний оверхед $\approx 10\%$ від байт/с.

Запас на надійність/варіації мережі = 20%.

Сценарій В (Клінічна телеметрія – 12 відведень).

Частота дискретизації $f_s = 500$ Гц.

Розрядність = 16 біт = 2 байти/відлік.

Кількість каналів $N_{ch} = 12$.

Вибір пакету: $N_{s/pkt} = 50$ відліків в пакеті.

Мережеві заголовки (IP+UDP+RTP) $\approx 20 + 8 + 12 = 40$ байт на пакет.

Оверхед = 10%.

Запас на надійність/варіації мережі = 20%.

Студент може змінювати $N_{s/pkt}$, оверхед і т.д.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з вихідними параметрами.
2. Обчислити сирий бітрейт.
3. Визначити кількість пакетів за секунду.
4. Обчислити повний обсяг переданих даних.
5. Врахувати службовий оверхед.
6. Врахувати запас на нестабільність каналу.
7. Провести розрахунок при компресії.

8. Провести аналіз чутливості: як змінюється результат при зміні частоти дискретизації, при різних коефіцієнтах стиснення.
9. Вибрати оптимальний канал передачі сигналу ЕКГ (NB-IoT, LoRaWAN, 3G, LTE, Wi-Fi).

Дані для каналів

Канал	Типова швидкість
LoRaWAN	0,3–50 кбіт/с
NB-IoT	20–250 кбіт/с
3G	до 2 Мбіт/с
4G LTE	десятки Мбіт/с
Wi-Fi	сотні Мбіт/с
Ethernet	>100 Мбіт/с

Контрольні питання

1. Що таке пропускна здатність каналу?
2. Як частота дискретизації впливає на бітрейт?
3. Чому використовують пакетизацію?
4. Які переваги компресії?
5. Чому надмірне стиснення небезпечно для медичних сигналів?
6. Який канал найкращий для телеметрії ЕКГ?