

Д. В. Євграфов, Ю. Є. Яремчук
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021 Вінниця, Україна

Розрахункові спектри сигналів витоку інформації з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах

Розглянуто роботи, які присвячено аналізу структури сигналів витоку інформації з моніторів і протиріччя в їхньому поданні для різних типорозмірів екранів, що виникають завдяки неточностям у вимірюваннях їхніх спектральних характеристик. Обґрунтовано типову модель сигналу витоку у вигляді послідовності пікселів, горизонтальних бланк-імпульсів і вертикальних бланк-імпульсів. Розглянуто процеси формування сигналів у відеокартах моніторів персональних обчислювальних машин і для спрощеного (двохвідтінкового статичного зображення) знайдено спектральне подання тестового сигналу у вигляді послідовності білих і чорних пікселів, що формують вертикальні смуги, шириною у піксель для нескінченного часу аналізу. Отримано часові моделі сигналів зі спектральними характеристиками, які різняться від вимірних з відносними похибками в одиниці відсотків. Зроблено розрахунки спектрів для чотирьох типорозмірів екранів моніторів. Зазначено, що часові моделі витоку інформації з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах є придатними для подальших досліджень побічних випромінювань лише після перевірки відповідності розрахованих спектрів реальним побічним випромінюванням з екранів моніторів, отриманих в екранованій від радіовипромінювань кімнаті.

Ключові слова: *побічні електромагнітні випромінювання і наведення, сигнали відеокарти, коефіцієнти Фур'є, рідкокристалеві структури, спектри сигналів витоку інформації з екрану монітора.*

Вступ

Для більшості комп'ютерів виникнення побічних електромагнітних полів є небажаним результатом їхньої роботи. Одним із джерел таких полів є працюючі екрани моніторів персональних обчислювальних машин (ПЕОМ), що побудовані на рідкокристалевих структурах (РКС). Вони випромінюють радіохвилі у діапазоні частот від 3 кГц до 1800 МГц [1], а для боротьби з витоком інформації подібними радіоканалами необхідно розуміти структуру сигналів витоку.

© Д. В. Євграфов, Ю. Є. Яремчук

Нажаль цю інформацію більшою мірою подано в іноземних джерелах, де не завжди чітко прописані умови проведення експериментів. Дуже часто доводиться домислювати ті або інші невідомі параметри сигналів, а жодна із задач, що розв'язуються як для зняття інформації з екрану монітору, так і для збереження інформації від витоку технічними каналами не ґрунтується на головному — визначенні чіткої моделі сигналів витоку інформації з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах. Тому актуальним залишається відповідь на питання: «Якими мають бути спектри сигналів витоку інформації?»

Постановка задачі

Існує декілька подань сигналів, які надходять на монітор ПЕОМ [2–4]. Зображення на екрані формується з трьох сигналів: червоного, зеленого та синього (RGB), які надсилають інформацію про кольори на монітор через VGA-кабель. Рівні сигналів, змінюючись від 0 В (абсолютно темні) до 0,7 В (максимальна яскравість), визначають інтенсивності кожного кольорового компонента, які при об'єднанні створюють колір пікселя на екрані монітора.

Кадр на екрані монітора складається з h строк по w пікселів кожний, тобто складається з $w \times h$ пікселів, типорозміри яких: 640×480 , 800×600 , 1024×768 , 1152×864 , 1280×1024 , 1600×1200 , 2048×1536 . Кожний кадр формується надсиланням рамки пікселів на монітор за допомогою двох сигналів синхронізації: горизонтальної, яка вказує на початок і зупинку кожної строки пікселів, що йдуть зліва направо на екрані, і вертикальну, яка позначає верхню та нижню строки, що складаються в кадр.

У роботі [2] проілюстровано часову структуру одного із RGB-сигналів на прикладі типорозміру екрану 800×600 пікселів. Сигнали червоного (R), зеленого (G) і синього (B) кольорів подаються на монітор протягом інтервалу $T_c = 31,77$ мкс, що складається з лінії пікселів строки, тривалістю $\tau_{\text{сум. н.}} = 25,17$ мкс та замикаючого синхроімпульсу зворотного ходу променя, тривалістю у $\tau_c = 6,6$ мкс (рис. 1).

Негативні імпульси на горизонтальному сигналі синхронізації позначають початок і кінець строки та забезпечують відображення пікселів між лівим і правим краями зони видимого екрану. Аналогічним чином негативні імпульси на вертикальному сигналі синхронізації позначають початок і кінець кадру та забезпечують відображення монітором ліній між верхнім і нижнім краями видимого екрану монітора. При цьому час кожного кадру $T_k = 16,784$ мс складається з часу передавання всіх строк тривалістю у $\tau_{\text{сум. с.}} = 15,25$ мс та замикаючого синхроімпульсу зворотного ходу променя кадру тривалістю $\tau_k = 1,534$ мс, під час якого сигнали RGB блокуються.

У табл. 1 наведено залежності частоти кадрів $f_{\text{ver}} = 1/T_k$, строк $f_{\text{hor}} = 1/T_c$ та пікселів $f_{\text{pic}} = 1/\tau_n$ залежно від типорозміру $w \times h$ та роздільної здатності монітора [3]. Можна перекоонатися, що в наданій у роботі [2] моделі сигналу вкратка помилка. Оскільки

$$T_c = \frac{\tau_{\text{сум. с.}}}{h}, \quad (1)$$

де h — як і раніше, кількість строк на РКС екрані, подані на рис. 1 часові параметри відповідають типорозміру 640×480 пікселів, а не, як зазначено у роботі, 800×600 пікселів. При цьому частота кадрів дорівнює

$$f_{\text{ver}} = \frac{1}{T_k} = \frac{1}{16,784 \text{ мс}} \approx 59,58 \text{ Гц},$$

що дещо відрізняється від наданої у табл. 1 $f_{\text{ver}} = 59,9$ Гц і тому потребує додаткових досліджень. Проте вже на етапі постановки задачі можна казати про помилковість наданої у [2] інформації про структуру сигналу для типорозміру 800×600 пікселів: вона подана для типорозміру 640×480 пікселів.

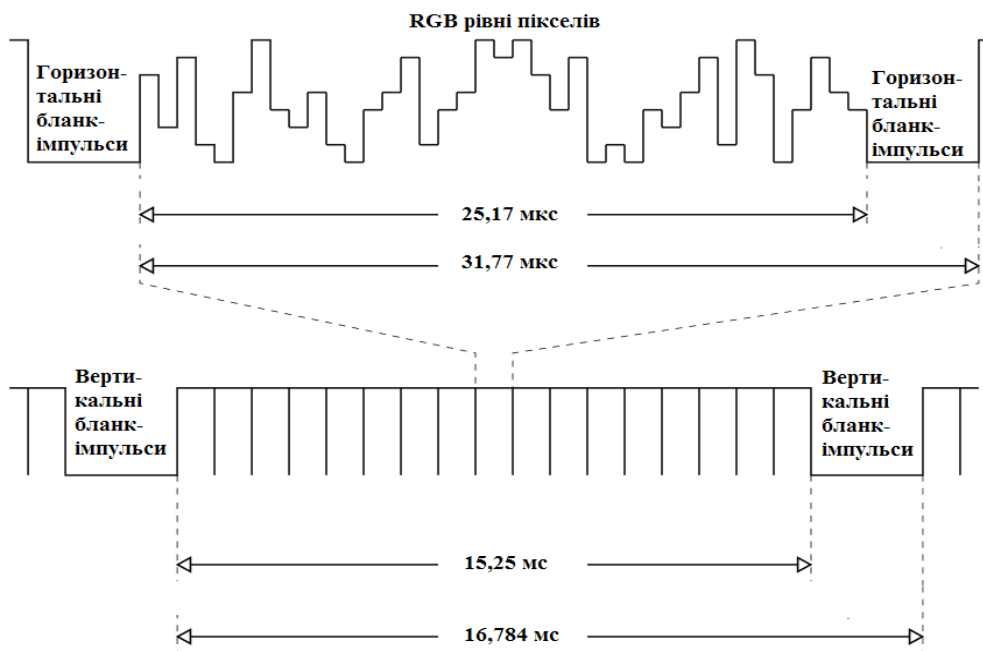


Рис. 1. RGB-сигнали з відеокарти, які подаються на монітор

З урахуванням (1), можна точно визначити час передавання всіх строк зображення:

$$\tau_{\text{сум. с.}} = \frac{h}{f_{\text{hor}}},$$

а оскільки з урахуванням структури сигналу

$$T_k = \tau_{\text{сум. с.}} + \tau_k, \quad (2)$$

таким же чином можна визначити тривалості вертикальних бланк-імпульсів:

$$\tau_k = \frac{1}{f_{\text{ver}}} - \frac{h}{f_{\text{hor}}}. \quad (3)$$

Коли відома частота пікселів f_{pic} , з урахуванням того, що

$$T_c = \tau_{сум. н.} + \tau_c, \quad (4)$$

можна визначити тривалості горизонтальних бланк-імпульсів:

$$\tau_c = \frac{1}{f_{hor}} - \frac{w}{f_{pic}}. \quad (5)$$

Проте, маючи велику кількість розбіжностей між поданням структури сигналів з екрану моніторів а також брак інформації про f_{pic} , важливо знайти правильну модель сигналів витоку, яка не лише підтвердить, або спростує результати розглянутих публікацій, а і буде підтверджено результатами експериментальних досліджень спектральних характеристик сигналів витоку.

Таблиця 1. Залежності частот синхронізації від типорозміру екрану

Типорозмір	Режим VESA	f_{ver} , Гц	f_{hor} , кГц	f_{pic} , МГц
640×480	VGA (60 Hz)	59,9	31,5	25,2
640×480	VGA (72 Hz)	72,8	37,9	31,5
640×480	VGA (85 Hz)	85,0	43,3	35,9
800×600	SVGA (60 Hz)	60,3	37,9	40,0
800×600	SVGA (85 Hz)	85,1	53,7	56,3
1024×768	XGA (60 Hz)	60,0	48,4	64,8
1024×768	XGA (85 Hz)	85,0	68,7	94,8
1152×864	(85 Hz)	85,0	77,5	–
1280×1024	SXGA (60 Hz)	60,0	64,0	107,6
1280×1024	SXGA (75 Hz)	75,0	79,9	135
1280×1024	SXGA (85 Hz)	85,0	91,1	–
1600×1200	(85 Hz)	85,0	106,3	–
2048×1536	(75 Hz)	75,0	102,2	–
Екрани зі співвідношеннями розмірів, іншими за 4×3				
1600×1024	(60 Hz)	60,0	63,6	–
1600×1024	(85 Hz)	85,0	91,4	–
1920×1200	(60 Hz)	60,0	74,5	–
1920×1200	(85 Hz)	85,0	107,1	–
2304×1440	(80 Hz)	80,0	120,6	–

Метою роботи є: обґрунтування спектра сигналів побічних електромагнітних випромінювань і наведень (ПЕМВІН) з екрану монітору ПЕОМ на РКС, на який виводиться статичне зображення тестового сигналу. Вважатиме зображення достатньо контрастним (наприклад білі вертикальні смуги на чорному екрані), тобто такі, що мають лише два тони, а RGB-сигнали — дві амплітуди. Обґрунтування здійснимо розрахунками коефіцієнтів Фур'є для нескінченно періодичної тривалості тестового сигналу у вигляді меандру з пікселів білого та чорного кольорів у строчці, які складатимуться у вертикальні смуги шириною в піксель. Надалі, необхідно порівняти коефіцієнти з результатами вимірювання спектрів побічних сигналів з екрану працюючого монітора на РКС в екранованому примі-

щенні, та зробимо висновки про відповідність або невідповідність моделей сигналів витоку раніше відомим результатам спектральних вимірювань побічних випромінювань.

Розв'язання задачі в умовах визначеності щодо спектральних характеристик сигналів витоку

Для визначених значень w , h , f_{ver} , f_{hor} , f_{pic} відшукати модель витоку інформації з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах, а саме параметри T_c , $\tau_{сум. п.}$, τ_c , T_k , $\tau_{сум. с.}$ та τ_k , є простою задачею. Часові параметри сигналу для повністю визначених у табл. 1 спектральних характеристик, розраховані з використанням (3) і (5) і подані у табл. 2, а параметри $\tau_{сум. п.}$ та $\tau_{сум. с.}$ можуть бути легко розрахованими з використанням виразів (2) і (4).

Таблиця 2. Залежності часових параметрів сигналів витоку інформації від типорозміру екрану

Типорозмір і режим VESA	T_k , мс	τ_k , мс	T_c , мкс	τ_c , мкс
640×480 VGA (60 Hz)	16,694	1,456	31,746	6,349
640×480 VGA (72 Hz)	13,736	1,071	26,385	6,068
640×480 VGA (85 Hz)	11,765	0,679	23,095	5,267
800×600 SVGA (60 Hz)	16,584	0,753	26,385	6,385
800×600 SVGA (85 Hz)	11,751	0,578	18,622	4,412
1024×768 XGA (60 Hz)	16,667	0,799	20,661	4,859
1024×768 XGA (85 Hz)	11,765	0,586	14,556	3,754
1280×1024 SXGA (60 Hz)	16,667	0,667	15,625	3,729
1280×1024 SXGA (75 Hz)	13,333	0,517	12,516	3,034

Як бачимо, розраховане значення параметрів сигналів, подане у табл. 2 (перша стрічка), розбігається з поданими у роботі [2] з відносними похибками, що не перевищують 3,5 %.

Розв'язання задачі обґрунтування коефіцієнтів Фур'є

Оскільки досліджується статичне зображення на екрані тестового сигналу вважатимемо час аналізу сигналу нескінченним, а подальші вимірювання спектрів побічних випромінювань робитимемо для максимально можливого часу аналізу спектроаналізатора T_a . У цьому випадку сигнал витоку з екрану монітора є періодичною функцією, з періодом T_k у часі, а спектри сигналів матимуть дискретні складові з частотами $f_k = k / T_k$, $k = 0, 1, 2, \dots, K$, K — максимальний індекс спектрального аналізу.

Для спрощення розрахунків коефіцієнтів Фур'є вважатимемо періодичний сигнал парною функцією, для якого кадр на рис. 1 розташуємо симетрично осі ординат, що розбиває його навпіл (рис. 2).

У цьому випадку модулі коефіцієнтів ряду Фур'є розраховуватимуться за виразом

$$S(k) = \frac{2}{T_k} \left| \int_{-\frac{T_k}{2}}^{\frac{T_k}{2}} C(t) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_k}\right) dt \right|, \quad (6)$$

а оскільки сигнал $C(t)$ матиме лише два значення «0» та «1», розрахунок інтегралу (6) можна замінити подвійною сумою, сформованою інтервалами часу $[iT_c + \tau_c/2 + 2m\tau_n, iT_c + \tau_c/2 + 2m\tau_n + \tau_n]$, на яких $C(t)=1$, де i, m — поточні строки та місцеположення пікселя у строчці:

$$\tau_n = \frac{\tau_{\text{сум. п.}}}{w}. \quad (7)$$

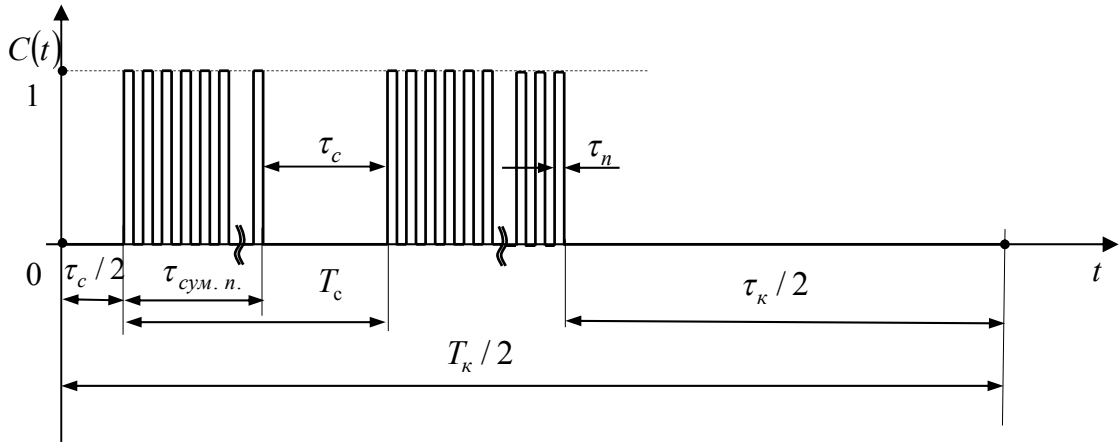


Рис. 2. Напівчастина періодичного сигналу

Інтеграл (6) матиме при цьому вигляд:

$$S(k) = \frac{1}{\pi k} \left| \sum_{i=0}^{h-1} \sum_{m=0}^{w/2-1} \sin\left[\frac{2\pi k(iT_c + \tau_c/2 + 2m\tau_n + \tau_n)}{T_k}\right] - \sin\left[\frac{2\pi k(iT_c + \tau_c/2 + 2m\tau_n)}{T_k}\right] \right|. \quad (8)$$

Кінцеві суми у (8) відомі [5], а остаточний вираз для модулів коефіцієнтів Фур'є можна подати у вигляді:

$$S(k) = \frac{1}{\pi k} \left| \frac{\sin\left(\frac{h\pi k T_c}{T_k}\right) \sin\left(\frac{w\pi k \tau_n}{T_k}\right)}{\sin\left(\frac{\pi k T_c}{T_k}\right) \sin\left(\frac{2\pi k \tau_n}{T_k}\right)} \sin\left(\frac{\pi k}{T_k}([h-1]T_c + w\tau_n + \tau_c)\right) - \frac{\sin\left(\frac{h\pi k T_c}{T_k}\right) \sin\left(\frac{w\pi k \tau_n}{T_k}\right)}{\sin\left(\frac{\pi k T_c}{T_k}\right) \sin\left(\frac{2\pi k \tau_n}{T_k}\right)} \sin\left(\frac{\pi k}{T_k}([h-1]T_c + w\tau_n + \tau_c - 2\tau_n)\right) \right|. \quad (9)$$

На рис. 3 для логарифмічної осі ординат проілюстровано результати розрахунку відповідно до (9) для $w = 640$, $h = 480$ та $K = 10^7$, і моделі сигналу з часовими параметрами, наданими рис. 1 та розрахованими з урахуванням (7).

На спектрограмі чітко прослідковуються максимуми, які відстають один від одного на $1/\tau_n \approx 25,45$ МГц (на 0,98 % відрізняється від f_{pic} табл. 1), а перший максимум зворотно пропорційний періоду слідування пікселів $1/2\tau_n \approx 12,72$ МГц. При розтягуванні спектрограми по осі абсцис прослідковуються також періодичні структури, які відстають одна від іншої на $1/T_c \approx 31,476$ кГц (на 0,07 % відрізняється від f_{hor} у табл. 1).

На рис. 4 для логарифмічної осі ординат проілюстровано результати розрахунку відповідно до (9) для $w = 800$, $h = 600$ SVGA (85 Hz), на рис. 5 — для $w = 1024$, $h = 768$ XGA (85 Hz), а на рис. 6 — для $w = 1280$, $h = 1024$ SXGA (75 Hz), при $K = 10^7$.

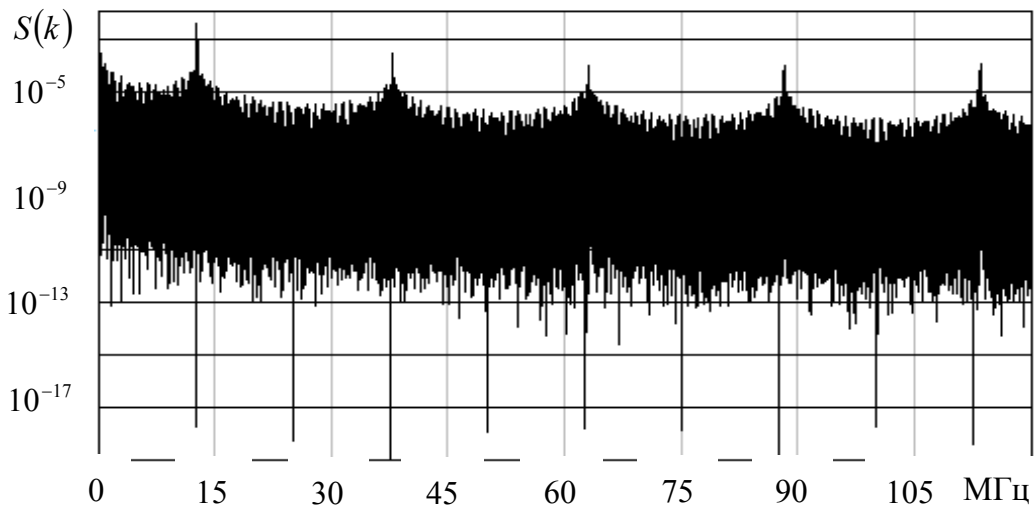


Рис. 3. Розрахунковий спектр сигналу витоку інформації для $w = 640$ та $h = 480$

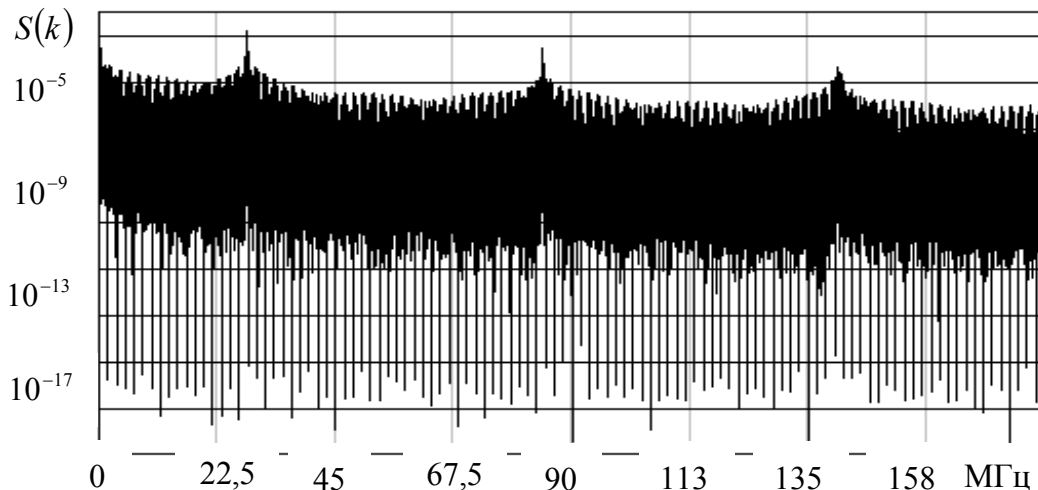


Рис. 4. Розрахунковий спектр сигналу витоку інформації для $w = 800$ та $h = 600$

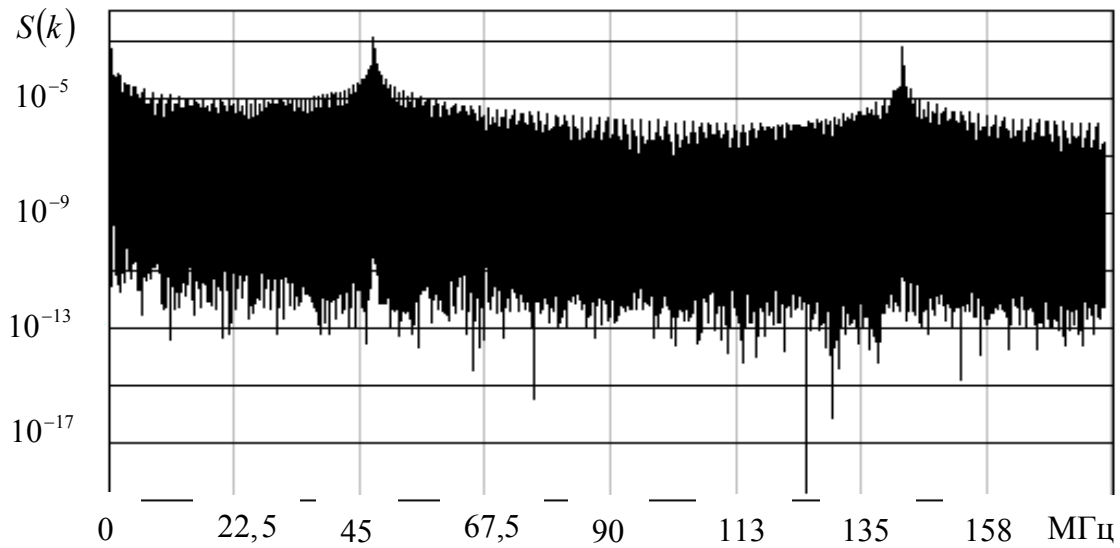


Рис. 5. Розрахунковий спектр сигналу витоку інформації для $w = 1024$ та $h = 768$

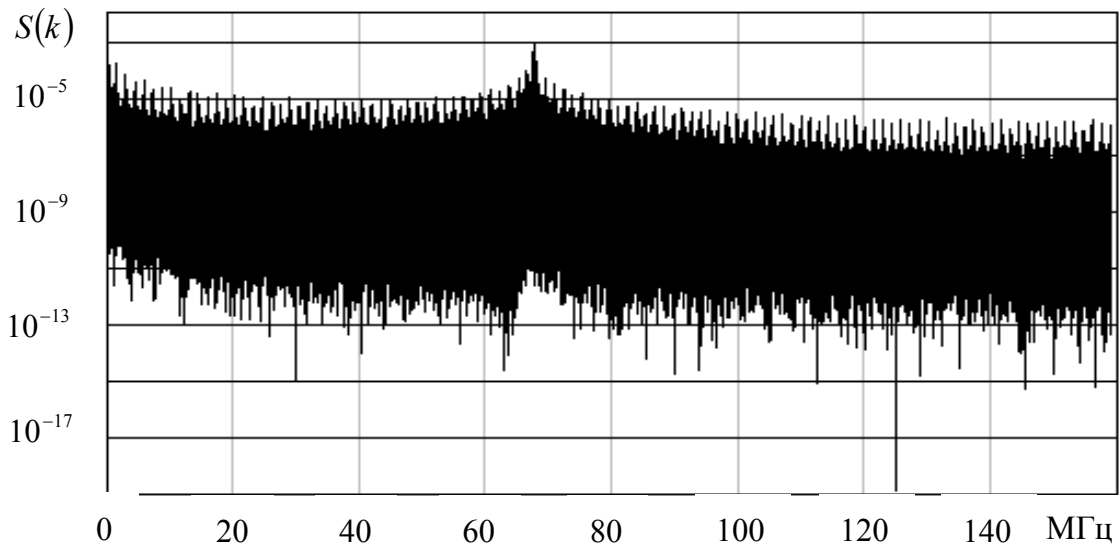


Рис. 6. Розрахунковий спектр сигналу витоку інформації для $w = 1280$ та $h = 1024$

Подана теорія має вагу лише після перевірки розрахункових результатів в екранованій кімнаті, в якій необхідно дослідити відповідності отриманих розрахункових спектрів реальним побічним випромінюванням з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах при використанні зазначених тестових сигналів.

Висновки

1. Запропоновані моделі RGB-сигналів для моніторів на рідкокристалевих структурах адекватно подають спектри сигналів витоку інформації принаймні для тестових сигналів. Абсолютна похибка спектрального подання відносно відомих

замірів спектральних складових не перевищує одного відсотка — для високих частот, та однієї десятої відсотка — для низьких.

2. Подальші дослідження в обраному напрямі потребують застосування екранованої кімнати для з'ясування відповідності отриманих розрахункових спектрів реальним побічним випромінюванням з екранів моніторів на рідкокристалевих структурах при використанні зазначених тестових сигналів.

1. Євграфов Д.В. Фізичні основи захисту інформації в радіоелектронній апаратурі: навч. посіб. — Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 176 с. Бібліогр.: С. 170–172.

2. Markus G. Kuhn. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays. Technical Report UCAM-CL-TR-577. University of Cambridge, Computer Laboratory, December 2003.

3. Kuhn M.G. Optical Time-Domain Eavesdropping Risks of CRT Displays, '. Proceedings 2002 IEEE Symposium on Security and Privacy, Berkeley, California, 12–15 May 2002.

4. Наконечний Т.А., Євграфов Д.В. Перехоплення сигналу витоку інформації з екрану монітора. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Радіотехнічний факультет НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського, 18–24 листопада 2018 року. м. Київ, Україна.

5. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 797 с.

Надійшла до редакції 01.06.2021