

RADIO TECHNICAL DEVICES РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ

УДК 621.396:004.056.5

DOI:10.30837/rt.2024.1.216.06

*А.М. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, Ю.В. ЛИКОВ, канд. техн. наук,
В. І. ЗАБОЛОТНИЙ, канд. техн. наук*

ОЦІНКА ПОХИБКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ РАДІОАКУСТИЧНИХ ЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАСОБАМИ АКУСТИЧНОЇ ДАЛЕКОМЕТРІЇ

Вступ

Локалізація радіоакустичного закладного пристрою (РАЗП) – це визначення його місця розташування у просторі. Локалізація РАЗП може здійснюватися як по електромагнітному полю, так і із застосуванням акустичних зондувальних сигналів [1 – 4]

Локалізація по електромагнітному полю здійснюється за допомогою рознесених у просторі антен. Може бути як пасивною, так і активною. При цьому антени розміщують у різних точках приміщення, після чого, вимірюючи рівень сигналу РАЗП на кожній антені, визначають антену з максимальним рівнем. Ділянка розташування антени досліджується або візуально, або за допомогою спеціальної техніки (індикаторів поля, нелінійних локаторів тощо). Слід зазначити, що цей метод надає приблизну оцінку місця розташування РАЗП, і подальші пошуки РАЗП спеціальними засобами може зайняти деякий час.

Метод локалізації за допомогою акустичних зондувальних сигналів дозволяє визначити координати точки (з деякою похибкою) у просторі, де розташовано РАЗП. При цьому використовується двовимірний або тривимірний триангуляційний метод визначення місця розташування РАЗП. Подальший пошук додатковими спеціальними засобами поблизу цієї точки може значно зменшити час на проведення пошукових операцій.

Як метод локалізації радіоакустичного закладного пристрою із використанням акустичних сигналів може застосовуватися спосіб акустичної зав'язки, який у цій роботі не розглядається.

Локалізація із застосування акустичних зондувальних сигналів здійснюється за допомогою акустичного далекоміра (АД) у складі апаратно-програмного комплексу (АПК) для виявлення РАЗП (наприклад АПК «ОРТ», «VOSTOK») [3,4]. Ця функція наявна не в усіх АПК.

Структурну схему акустичного далекоміра АПК «VOSTOK» і схему його увімкнення показано на рис. 1.

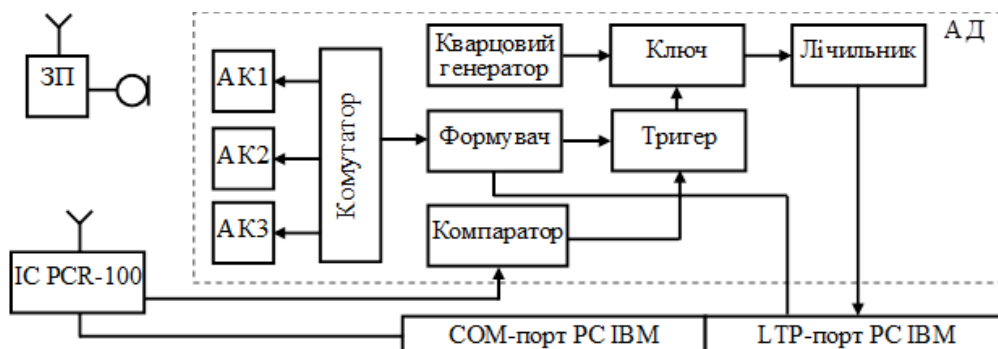


Рис. 1. Структурна схема акустичного далекоміра АПК «VOSTOK»

АД є окремим пристроєм, який формує акустичну хвилю і вимірює час поширення акустичного сигналу до РАЗП. Результат вимірювань вводиться до ПК для подальшої обробки.

Принцип роботи АД наступний. Акустична колонка (АК) відтворює звукове клацання (зондує акустичний сигнал). Акустична хвиля із сферичним фронтом, поширюючись у

просторі, через певний час t надходить до мікрофону РАЗП, який перевипромінює прийнятий імпульс по радіостеру. Часом поширення радіохвилі до РАЗП нехтують. Сигнал приймається приймачем і демодулюється у відеоімпульс. Якщо вимірювати час t від клацання до появи цього відеоімпульсу на виході приймача і помножити час t на швидкість звуку, то вийде відстань до РАЗП. Причому чим точніше виміряно час, тим точніше обчислюється відстань.

Одне вимірювання дає радіус сфери, на будь-якій точці поверхні якої може перебувати РАЗП. Якщо вимірювання виконати з двох рознесених точок, то РАЗП буде розташована на колі, що є лінією перетинання цих двох сфер. Однозначно визначити місце розташування можна, вимірюючи відстань до РАЗП з трьох рознесених точок, що лежать, наприклад, на вершинах рівнобічного трикутника.

Розглянута методика апаратно реалізована у деяких АПК за допомогою звукової карти з використанням однієї рухомої колонки, що не надто зручно. При цьому одночасно відтворюється wave-файл і записується сигнал з лінійного входу звукової карти, але виникає проблема синхронізації часу між початком операції читання даних з приймача і часом початку звукового тесту. Обидві операції ініціюються програмно, і значення часового інтервалу між ними залежить від потужності комп'ютера, обсягу буфера драйверів звукової карти, мультизадачного середовища Windows тощо. Досвід свідчить, що цей інтервал у деяких комп'ютерах може досягати суттєвих значень, перераховуючи у відстань – до 20 м.

Щоб уникнути зазначених вище проблем, в АПК «VOSTOK» АД реалізовано апаратно як окремий пристрій, який виконує функції формування клацання і точного визначення часу поширення акустичного сигналу, а результат вводиться у комп'ютер для подальшої обробки. АД містить кварцовий генератор, лічильник, одинібратор (для формування клацання), компаратор (для формування прямокутного імпульсу зупинки лічення з відеоімпульсу на тлі шуму, що надходить з виходу приймача), три акустичні колонки. Керування пристроєм здійснюється від комп'ютера через стандартний паралельний порт.

Оцінка похибки локалізації РАЗП комплексом «VOSTOK»

Похибка вимірювання координат РАЗП акустичним далекоміром складається з апаратної та випадкової похибок вимірювання дальності, а також методичної похибки визначення місця розташування РАЗП, яка обумовлена особливостями далекомірного методу визначення координат [3, 4].

Апаратна похибка вимірювання дальності обумовлена, насамперед, скінченним значенням кроку дискретизації лічильних імпульсів кварцового генератора АД, яка не перевищує 1 см при вибраній частоті 40 кГц. Цю похибку можна зменшити на порядок, але у цьому немає сенсу через наявність значної випадкової похибки, яка викликана шумами. Апаратна похибка вимірювання дальності через варіацію швидкості поширення звуку в повітрі у межах 332 – 344 м/с при змінюванні температури від 0° до 20° С надто мала і може не враховуватися.

Часова фіксація імпульсів за положенням одного з фронтів

Часова фіксація імпульсів за положенням фронтів є найбільш розповсюдженою.

В АД фіксація часового положення імпульсу може здійснюватися по передньому фронту прийнятого сигналу з використанням компаратора, який виявляє сигнал відносно порогової напруги порівняння. Внаслідок впливу шуму точка фіксації часового положення імпульсу зміниться, що спричинює появу випадкової похибки вимірювання дальності.

Середньоквадратичне значення шумової похибки σ_{t1} прямо пропорційне діючому значенню шуму і обернено пропорційне крутості фронту імпульсу в точці порівняння сигналу та порогу. Середньоквадратичну помилку визначення часового положення імпульсу на виході лінійного амплітудного детектора можна знайти із виразу [5]

$$\Delta \tau_1 = \frac{\sigma_{t1}}{\sqrt{n}} = \frac{T_{\Phi}}{q\sqrt{2n}}, \quad (1)$$

де q – відношення С/Ш на вході детектора; n – кількість імпульсів для лічення; T_{ϕ} – тривалість фронту сигнального імпульсу.

Помноживши $\Delta\tau_1$ на швидкість звуку, можна знайти середньоквадратичну помилку σ_d визначення дальності до РАЗП:

$$\sigma_d = \frac{c}{\sqrt{2 \cdot n \cdot q \cdot \Delta f}}, \quad (2)$$

де Δf – смуга пропускання приймача; c – швидкість звуку.

Точно визначити T_{ϕ} складно, оскільки на його форму впливає АЧХ акустичного випромінювача, мікрофона РАЗП, кількість та взаємне розташування меблів у приміщенні, а також смуга пропускання приймача.

У програмі підтримки АД передбачена можливість оперативного регулювання рівня сигналу, який надходить зі сканувального приймача, а в апаратній частині використовують індикатор перевищення порогового рівня U_0 , що дозволяє швидко адаптувати АД до конкретного РАЗП.

Розрахунки показують, що в найгіршому випадку середньоквадратична похибка визначення відстані від акустичної колонки до РАЗП при правильному настроюванні роботи АД становить декілька сантиметрів.

Зазвичай за часове положення сигналу беруть положення точки перетинання певного рівня порівняння U_0 з переднім фронтом імпульсу. Цей спосіб фіксації застосовують як в радіолокації, так і при імпульсному радіозв'язку. Розповсюдженість методу обумовлена його простотою.

Під впливом малого шуму виникає помилка фіксації часового положення імпульсу. Середньоквадратичну помилку відліку визначають за формулою (1).

Для розглянутого способу фіксації імпульсів обчислюють ширину смуги пропускання фільтра перед детектором Δf_0 , яка забезпечує мінімум помилки (1) [5]:

$$\Delta f_0 \approx \frac{1}{T_{\phi 0}}, \quad (3)$$

де $T_{\phi 0}$ – тривалість фронту імпульсу на вході фільтра.

Формулу (1) при оптимальній смузі (3), враховуючи $\sigma_0 = \sqrt{N_0 \cdot \Delta f_0}$ можна записати:

$$\Delta\tau_1 = \frac{\sqrt{N_0 \cdot \Delta f_0}}{U_{c0}} \cdot \frac{T_{\phi}}{T_{\phi 0} \cdot \sqrt{n}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

де U_{c0} – амплітуда сигнальних імпульсів на вході приймача.

З порівняння виразів (1) і (4) видно, що помилка (4) більша ніж гранична у $\sqrt{2} \cdot T_{\phi} / T_{\phi 0}$ разів. Якщо перед детектором увімкнено ідеальний смуговий фільтр зі смугою $\Delta f_0 = 1/T_{\phi 0}$, тоді $T_{\phi} / T_{\phi 0} = 1,2$ і збільшення становить $\sqrt{2} \cdot 1,2 = 1,7$. Для імпульсів, у яких тривалість фронту близька до повної тривалості ($T_{\phi 0} \approx T_{c0}$), втрати точності відліку збільшуються. Так, для імпульсу дзвіноподібної форми обчислено, що часова помилка відліку за точкою перетинання переднього фронту з рівнем 0,607 від амплітуди імпульсу, виходить у 2,08 рази більшою ніж гранична (імпульс пройшов крізь дзвіноподібний фільтр зі смугою у $\sqrt{3}$ разів ширшою спектра сигналу).

Головний недолік методу фіксації імпульсів по фронту в тому, що навіть за відсутності шуму можуть виникати значні часові помилки внаслідок змінювання амплітуди сигнальних імпульсів. Для зменшення цих помилок необхідно разом із зміною амплітуди імпульсів відповідно змінювати і величину рівня порівняння U_0 . Особливо негативно впливають швидкі зміни амплітуди сигнальних імпульсів. Існує кілька способів автоматичного встановлення рівня порівняння, наприклад:

- фіксація положення імпульсу за положенням заднього фронту, встановлюючи попередньо рівень за амплітудою чергового прийнятого імпульсу;
- фіксація положення імпульсу дзвіноподібної форми за точкою перетинання обвідної сигналу з її похідною.

Однак існують випадки, коли рівень порівняння не вдається встановити за амплітудою сигналу, а потрібно встановлювати за рівнем шуму, як наприклад, у випадку сигналу у вигляді кодованих груп імпульсів. У цих умовах метод фіксації імпульсів по фронту стає незадовільним.

Часова фіксація імпульсів за положенням обох фронтів

Часова фіксація імпульсів за положенням обох фронтів сигналу є більш досконалою.

Зручним є спосіб фіксації, при якому за часове положення сигналу беруть середину часового інтервалу між точками перетинання постійного рівня U_0 з фронтами сигнального імпульсу (рис. 2, точка t_0).

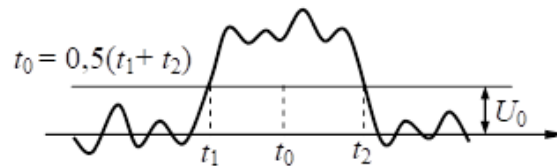


Рис. 2. Спосіб часової фіксації імпульсів за положенням обох фронтів

Положення точки t_0 пов'язано із положенням фронтів t_1 і t_2 співвідношенням

$$t_0 = \frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_2). \quad (5)$$

Якщо часові флуктуації точок t_1 і t_2 мають однакову дисперсію ($\sigma_{t_1}^2 = \sigma_{t_2}^2$), то дисперсія точки t_0 :

$$\sigma_{t_0}^2 = \frac{1}{2} \sigma_{t_1}^2 \cdot (1 + R_{1,2}), \quad (6)$$

де $R_{1,2}$ – коефіцієнт взаємної кореляції точок t_1 і t_2 .

У випадку, коли флуктуації точок обумовлені стаціонарним малим шумом з коефіцієнтом автокореляції $r(\tau)$, у формулу (6) замість $R_{1,2}$ потрібно підставляти $-r(T_c)$ (T_c – тривалість сигнального імпульсу на рівні U_0). Знак мінус враховує обставину, що при збільшенні миттєвого значення шуму на передньому і задньому фронтах точки t_1 і t_2 зміщуються в різних напрямках.

При визначенні часового положення імпульсів приблизно трапецеподібної форми, які виникають на виході лінійного амплітудного детектора і мають тривалість обох фронтів T_Φ , середньоквадратична помилка відліку на підставі співвідношень (1) і (6) становить

$$\Delta\tau_0 = \frac{T_\Phi}{2q} [1 - r(T_c)] \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

У випадку оптимальної смуги пропускання фільтра перед детектором (3) і достатньо великому значенні T_c , коли $r(T_c) \approx 0$, формулу (7) з урахуванням рівності $\sigma_0^2 = N_0 \cdot \Delta f_0$ записують у вигляді

$$\Delta\tau_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{N_0 \cdot \Delta f_0}}{U_{c0}} \cdot \frac{T_\Phi}{T_{\Phi 0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (8)$$

Помилка (8) перевищує граничну в $T_\Phi / T_{\Phi 0}$ разів, тобто не більше ніж на 20 %. При розглянутому способі відліку приблизно такі ж втрати виходять і для сигналів, у яких $T_{\Phi 0} \approx T_{c0}$. Це пов'язано з урахуванням кореляції точок t_1 і t_2 . Так, для згаданого під час обґрунтування

формули (4) випадку імпульсу дзвіноподібної форми, за тих самих умов, але при відліку за обома фронтами, помилка буде більшою, ніж гранична лише у $2,08 \cdot [1 - r(T_c)] / \sqrt{2} = 2,08 \cdot 0,8 / \sqrt{2} = 1,18$ разів.

Головна перевага фіксації імпульсів за обома фронтами порівняно із фіксацією за одним фронтом полягає у меншому впливі змінювань амплітуди сигналу на часове положення точки t_0 . Якщо сигнальні імпульси мають симетричну форму, то вплив змінювань амплітуди загалом виключається. Рівень порівняння можна встановлювати постійним і таким, щоб послабити вплив викидів шуму. Недоліком методу є певне ускладнення його технічної реалізації.

Часова фіксація імпульсів за положенням максимальних значень сигналу

Часова фіксація імпульсів за положенням максимальних значень сигналу є особливо цікавою. При узгодженій фільтрації сигнальних імпульсів часова помилка відліку стає сумірною із теоретично досяжною. Важливо також, що відношення сигналу до шуму на виході узгодженого фільтра, як відомо, є максимальним. Тому визначення положення сигналу за положенням максимальних значень дозволяє поєднувати граничну точність з найбільшою надійністю.

Положення максимуму реалізації сигналу і шуму, що виникає на виході узгодженого фільтра, іноді визначають за положенням нуля її похідної. При цьому складно відрізнити головний максимум від побічних, які обумовлені викидами шуму. Доводиться здійснювати попередню часову селекцію головного максимуму. Більш зручним є такий спосіб: сигнал, який пройшов узгоджений фільтр і детектор (рис. 3, а), обмежується знизу на рівні U_0 і потім диференціюється (рис. 3, б).

Далі сигнал надходить на підсилювач та двобічний обмежувач. В результаті виходить імпульс виду рис. 3, в. Якщо від'ємною ділянкою цього імпульсу запустити генератор, на виході буде імпульс, передній фронт якого збігається з положенням максимуму сигнального імпульсу (рис. 3, г). Встановлюючи потрібний рівень обмеження U_0 , при цьому способі можна простими технічними засобами ефективно послабити вплив викидів шуму, які не перевищують рівень обмеження, зберігаючи притаманну методу високу точність часової фіксації.

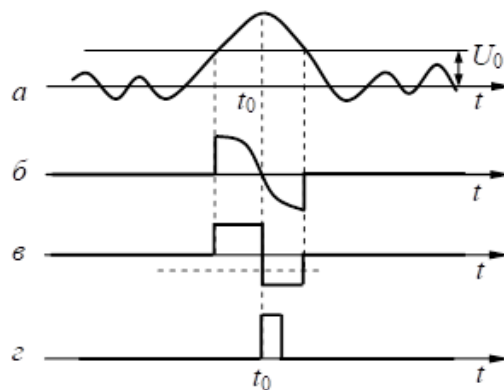


Рис. 3. Спосіб часова фіксації імпульсів за положенням максимальних значень сигналу

Переваги методу часової фіксації положенням максимальних значень по суті досягаються завдяки точним відомостям про форму та тривалість сигнальних імпульсів. Інакше неможливо побудувати узгоджений фільтр. При фіксації за фронтами можна загалом не мати попередньої інформації про тривалість сигнальних імпульсів, тому ці методи не виключають один одного.

Часова фіксація імпульсів кореляційним методом

Кореляційний метод фіксації часового положення імпульсів полягає у такому:

- 1) прийнятий сигнал демодулюється ;
- 2) визначається спектр прийнятого сигналу і акустичного сигналу, що надсилається;

3) обчислюється взаємна кореляційна функція (ВКФ) цих сигналів шляхом перемноження їхніх спектрів і застосування швидкого оберненого перетворення Фур'є;

4) визначення положення максимуму ВКФ, що і визначає положення імпульсу.

Головною перевагою цього методу є те, що при визначенні часового положення використовується енергія всього імпульсу, тому максимум ВКФ явно виражений. Працездатність методу зберігається і при достатньо низьких значеннях співвідношення сигнал/шум (с/ш). Фактично, граничне значення с/ш визначається величиною, яка необхідна для правильного детектування імпульсу.

Ще однією перевагою кореляційного методу є незалежність результату від флуктуацій амплітуди імпульсу, а отже – його висока стабільність та повторюваність результатів.

Недоліком методу є великий обсяг математичних обчислень, пов'язаних з перетворенням Фур'є. Але цей недолік легко усунути, застосовуючи сучасні комп'ютери.

Експериментальні дослідження похибки визначення розташування РАЗП

Для оцінки переваги кореляційного методу порівняно з пороговим проведено експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання похибки визначення місця розташування РАЗП. Експеримент був проведений на АПК "VOSTOK" з використанням цих двох методів [3, 4]. Комп'ютерне моделювання здійснювалось у математичному пакеті MathCAD.

Для порогового методу було змодельовано одиночний імпульс тривалістю 25 мс і тривалістю фронту 1 мс і взята вибірка обсягом 100. Пороговий рівень встановлено на 80 % от амплітуди імпульсу. Вибіркові значення змішувалися з нормальним шумом ($m_x = 0$, $\sigma_x = 1$), і реєструвалося часове положення зашумленого імпульсу залежно від співвідношення с/ш (по 100 «дослідів» на кожне значення с/ш). Співвідношення с/ш змінювалося від 1 до 20 з кроком 1. Для кожного значення с/ш визначалося середньоквадратичне відхилення оцінок місця розташування РАЗП.

Для моделювання кореляційним методом використано такий самий імпульс. Із нього отримано два імпульси (від РАЗП і комутатора) шляхом їх змішування з двома масивами нормально розподіленого шуму ($m_x = 0$, $\sigma_x = 1$). Далі обчислено ВКФ і визначено положення її максимуму залежно від співвідношення с/ш.

Залежності змінювання СКВ оцінок місця розташування РАЗП від співвідношення с/ш на вході приймача для двох методів визначення координат РАЗП (порогового (1) і кореляційного (2)) показано рис. 4.

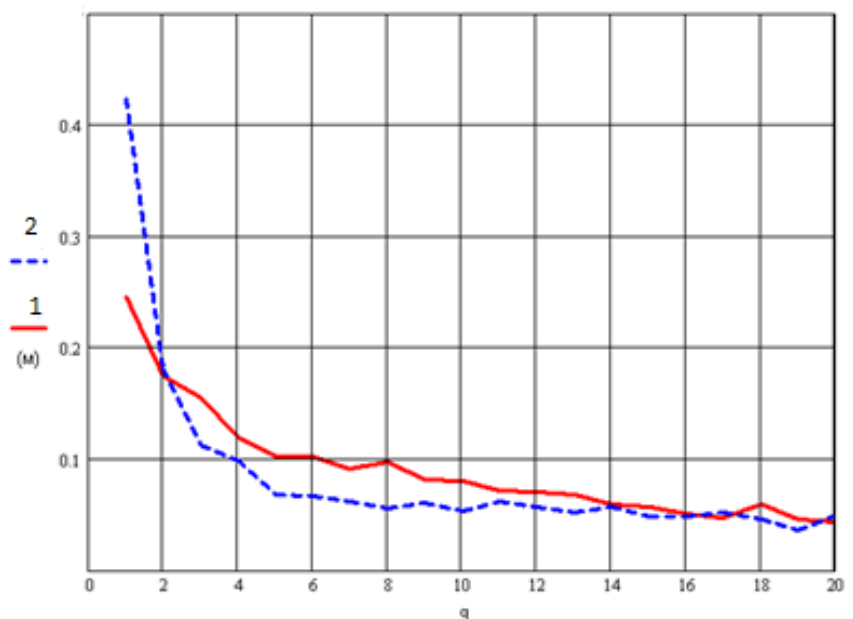


Рис. 4. Залежність СКВ оцінок місця розташування РАЗП від співвідношення с/ш

Із рис. 4 видно, що похибка кореляційного методу менше похибки порогового методу в діапазоні співвідношення с/ш від 2 до ~20. Це обумовлено тим, що у пороговому методі реєстрація часового положення імпульсу здійснюється по передньому фронту. При цьому незначні шумові флуктуації призводять до значних похибок. У кореляційному методі використовується енергія всього сигналу (розраховується ВКФ імпульсів, прийнятих по акустичному і радіоканалу), тому максимум імпульсу є явно вираженим, що дозволяє визначити його часове положення з малою похибкою. При великих співвідношеннях с/ш невеликі шумові флуктуації слабо впливають на точність фіксації часового положення імпульсу пороговим методом, тому результати обох методів стають практично ідентичними.

Експеримент проводився з використанням акустичного далекоміра АПК "VOSTOK" [3, 4].

Експериментальні залежності СКВ визначення місця розташування РАЗП від відстані від АД до РАЗП і кута між напрямком на РАЗП і перпендикуляром до площини АД для порогового (1) і кореляційного (2) способу фіксації часового положення імпульсу показано на рис. 5 і 6. (3 – розрахункова крива).

Як видно з рис. 5 і 6, експериментальні криві для порогового і кореляційного методів повторюють теоретичну криву (3), яка розрахована згідно з формулою

$$\sigma_{\text{мп}} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\sin \alpha}, \quad (9)$$

де σ_i – СКВ похибки визначення дальності від i -ї колонки; α – кут між лініями положення, який у свою чергу залежить від відстані від АД до РАЗП і кута між напрямком на РАЗП і перпендикуляром до площини АД.

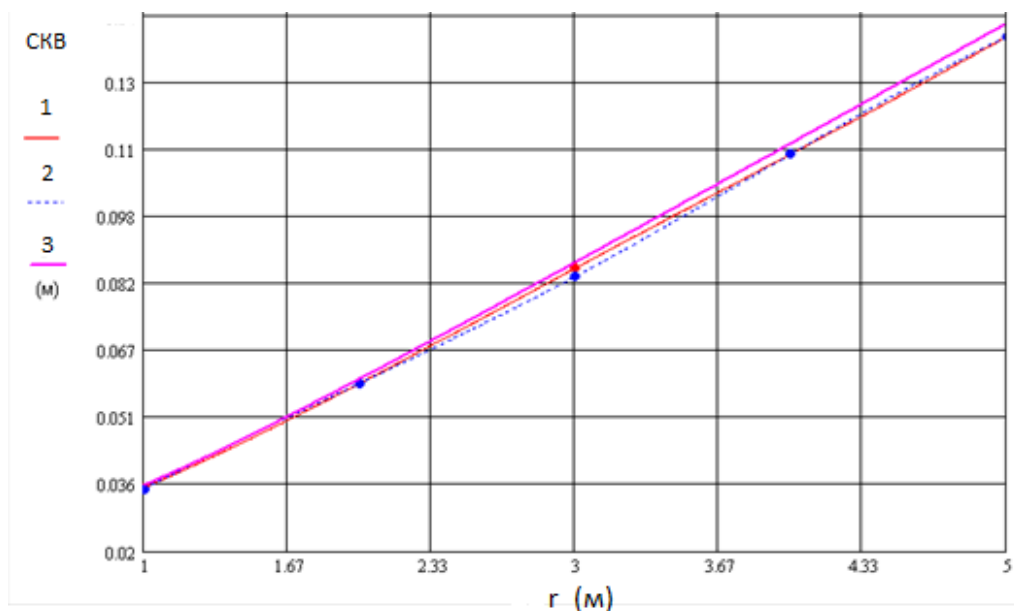


Рис. 5. Залежності СКВ похибки визначення місця розташування РАЗП від відстані від АД до РАЗП

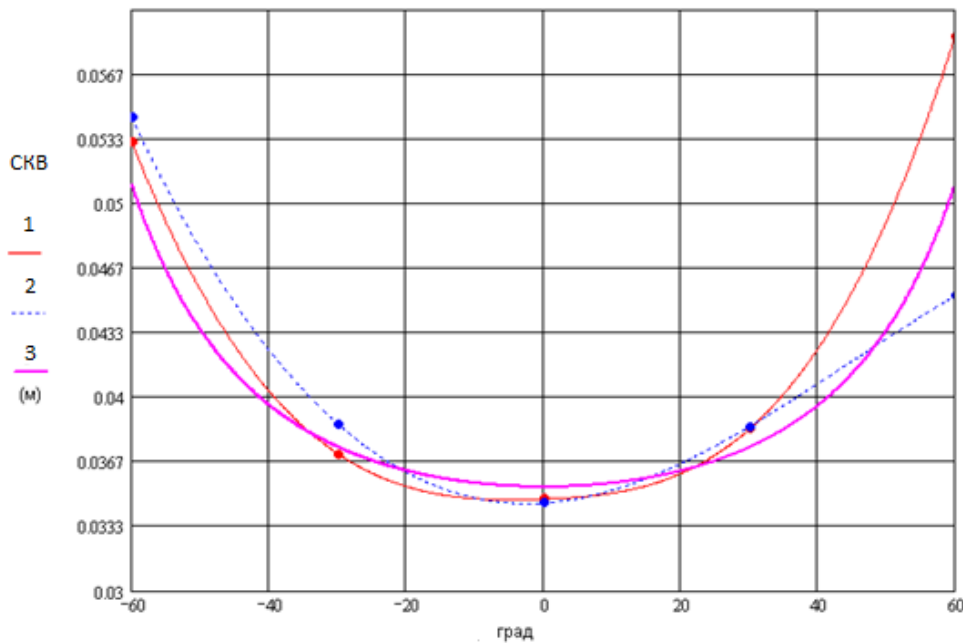


Рис. 6. Залежності СКВ похибки визначення місця розташування РАЗП від кута між напрямком на РАЗП і перпендикуляром до площини АД

Висновки

При локалізації закладних пристроїв, що використовують амплітудну або частотну модуляцію, за допомогою акустичного далекоміра доцільно використовувати кореляційний метод фіксації часового положення імпульсів. При цьому відмічається:

- зменшення середньоквадратичного відхилення похибки локалізації порівняно з пороговим методом на 15 % у діапазоні значень с/ш від 2 до 20;
- висока стабільність результатів;
- мала чутливість до змін амплітуди сигналу, що приймається

Список літератури:

1. Sathyamoorthy D., Jalis M., Md Jelas, Shalini Shafii. Wireless spy devices // A review of technologies and detection methods. November Defence S and T Technical Bulletin 7(2). 2014. 130–139 p. (<https://www.researchgate.net/publication/267751871>)
2. Пошук та локалізація радіозакладних пристроїв / В.О.Хорошко, О.Д.Азаров, Г.О.Максименко, Ю.Є.Яремчук. Вінниця : ВНТУ, 2007. 333 с.
3. Олейніков А.М., Коваль В.П. Особливості застосування апаратно-програмних комплексів для виявлення та локалізації закладних пристроїв // Захист інформації. Київ, 2002. N 3. С.28–36.
4. Засоби та системи технічного захисту інформації / І.С. Антіпов, А.М. Олейніков, Ю.В. Ликов, В.Д. Кукуш, І.О. Милютченко. Харків : ХНУРЕ, 2019. 216 с.
5. Мітяшов Б.М. Визначення часового положення імпульсів за наявності перешкод. Москва : Рад. радіо, 1962. 200 с.

Надійшла до редколегії 07.02.2024

Відомості про авторів:

Олейніков Анатолій Миколайович – канд. техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; e-mail: anatoly.oleynikov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4458-8833>

Ликов Юрій Володимирович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації; Україна; e-mail: yurii.lykov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7120-3276>

Заболотний Володимир Ілліч – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри безпеки інформаційних технологій, Україна; email volodymyr.zabolotnyi@nure.ua; ORCID:0000-0003-3258-8489