

УДК 621.396

Малюженко М.В., к.т.н.; Лободін Д.В.

ЗАТРИМКИ СИГНАЛІВ НА ВХОДІ СТАНЦІЇ РАДІОМОНІТОРИНГУ, ЯК ФАКТОР ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Maliuzhenko M.V., Lobodin D.V. Delay of the signals at the input of the radio monitoring station, as a factor of accuracy of determining the coordinated of the radio emission sources. Determination accuracy analysis of the radio emission sources. The techniques of radio emission sources, which are intended to identify and analyze radio obscure rays to identification sources of signals and interference, measurement signals and interference on the basis of extreme statement of the time-difference of arrival. The purpose of a theoretical study of radio techniques used in various fields of radio control. Task work is to study methods of radio, the effectiveness and accuracy of radio equipment. Coordinates are defined by the minimization of square functional that allows to consider information redundancy of the system and by that considerably to raise the coordinates determination accuracy. Statistical modeling scheme, and also the statistical characteristics analysis of the above-named system is provided. A method for accuracy enhancement of radiation source positioning by the range difference method with the use of passive satellite system, which is intended for radiomonitoring, is considered. An algorithm for cooperative signal processing in two-input antenna system is suggested. The results of mathematical modeling are presented.

Keywords: radiomonitoring, radio emission sources, methods for accuracy enhancement

Малюженко М.В., Лободін Д.В. Затримки сигналів на вході станцій радіомоніторингу, як фактор точності визначення координат джерел радіовипромінювання. Розглянуто питання щодо аналізу точності визначення координат джерел та підходи щодо здійснення задач радіомоніторингу, стосовно виявлення та аналізу радіовипромінювань для ідентифікації джерел сигналів і та радіозавод, інструментальна оцінка вимірювання параметрів сигналів і та радіозавод, Основна увага приділена аналізу методів підвищення ефективності та підвищенню точнісних характеристик радіоелектронних засобів. Запропоновано математичну модель з використанням статистичного підходу щодо оцінки затримки сигналів на вході декількох станцій радіомоніторингу. Запропоновано алгоритм спільної обробки сигналів у двох вхідних антенних системах. Наведено результати математичного моделювання.

Ключові слова: радіомоніторинг, джерела радіовипромінювання, методи підвищення точності

Малюженко М.В., Лободін Д.В. Задержки сигналов на входе станций радиомониторинга, как фактор точности определения координат источников радиоизлучения. Рассмотрены вопросы анализа точности определения координат источников и подходы по осуществлению задач радиомониторинга, по выявлению и анализу радиоизлучений для идентификации источников сигналов и и радиопомех, инструментальная оценка измерения параметров сигналов и и радиопомех, Основное внимание уделено анализу методов повышения эффективности и повышению точностных характеристик радиоэлектронных средств. Предложена математическая модель с использованием статистического подхода в оценке задержки сигналов на входе нескольких станций радиомониторинга. Предложен алгоритм совместной обработки сигналов в двух входных антенных системах. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: радиомониторинг, источники радиоизлучения, методы повышения точности

Вступ

Розвиток телекомунікаційних систем та технологій призводить до необхідності контролю щодо ефективності використання радіочастотного ресурсу та удосконалення його контролю. Однією із цілей такого контролю, в рамках задач проведення радіомоніторингу, є отримання відомостей про факт виявлення радіовипромінювання та визначення місцезнаходження його джерела шляхом виміру та аналізу параметрів радіовипромінювань радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв. Фактично це питання є одним з основних показників ефективності пасивних комплексів контролю електромагнітної

© Малюженко М.В., Лободін Д.В., 2018

обстановки, тим більше, що часто це поєднується з необхідністю ведення одночасного прийому сигналів декількох джерел радіовипромінювання, що рознесені в просторі, але одночасно подають сигнали в зоні проведення радіомоніторингу. Проблема розрізнення певної сукупності частотно-нероздільних за своїм спектром джерел радіовипромінювання є нагальною проблемою ефективності функціонування систем радіомоніторингу. Проблематика отримання численних характеристик похибок виміру координат обумовлена її залежністю від дії багатьох достатньо складних закономірностей, що в кінцевому рахунку і визначають їх точність: це і зовнішні умови поширення радіосигналів, і технічні характеристики систем, і параметри траєкторій рухомих об'єктів, що є джерелами радіовипромінювань, а також, що не менш важливо, коректність застосування отриманих результатів тим чи іншим алгоритмам математичного моделювання, і програмного забезпечення, що використовуються для цих цілей. Тобто факторів впливу на цей параметр достатньо багато і не всі з них піддаються математичному обліку.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вирішення цього питання вимагає побудови найбільш відповідної математичної моделі, яка б дозволяла отримати як коректні оцінки ймовірності вірного виявлення сигналу, так і інформацію щодо можливого місця розташування джерел цього сигналу. На підставі означеної інформації система радіомоніторингу шляхом різницево-дальномірною методу визначає середньоквадратичну похибку координат джерела радіовипромінювання шляхом оцінки напрямку просторового виміру дисперсії флуктуації фазового фронту хвилі, що надійшла на вхід приймальної станції.

Поширення радіохвиль супроводжується спотворенням радіосигналу, що має різнопланову природу: інтерактивні завади, перевидбиття, дисперсійні та дифракційні ефекти атмосфери тощо. При цьому радіосигнал спотворюється кожною спектральною складовою відповідно до її фазової швидкості. Останнє призводить до того, що окремі спектральні складові досягають входу приймального пристрою в різні моменти. Причому ці моменти приходу змінюються у випадковому порядку. Тобто розподіл зсувів часу секторальних складових сигналу носить випадковий характер, що і спричиняє дисперсійні спотворення. Наступна причина спотворень сигналів полягає в багатопроміневому характеру приходу сигналу за рахунок перевидбиття, що формує складну картину електромагнітного поля у точці прийому. Випадковий характер флуктуацій часу затримки несучої частоти та бокових спектральних складових сигналу призводить до випадковостей у співвідношенні їх амплітудних значень. Це може викликати зменшення рівня несучої і підвищення рівня бокових спектральних складових. Причому зростання кожної з бокових складових між собою теж проявляється нерівномірно. Відповідно процес флуктуації амплітуд відбувається в межах частотного спектру сигналу неузгоджено. Іншими словами, отримуємо, що інтерференційні замирання є випадковими і частотно-селективними. Крім того, суттєвий вплив на точність визначення координат додає така складова, як похибка вимірювання часу приходу сигналу на кожному окрему станцію, що входять до складу комплексу.

Оцінка точності визначення координат джерел радіовипромінювання системою радіомоніторингу в означених умовах потребує не тільки відповідної обробки отриманої інформації, але і з'ясування певних показників, що характеризують степінь відповідності між дійсними координатами джерела і їх отриманими оцінками. Такими показниками є похибка визначення координат, яку оцінюють середньою квадратичною похибкою радіуса місця розташування. Разом з тим, треба зауважити, що перед тим, як визначити місцеположення джерела по картині поля на вході приймального пристрою потрібно виявити сам факт наявності сигналу на фоні шумів. Кількісною оцінкою факту виявлення сигналу (за умов його дійсної наявності) служить ймовірність вірного (або правильного) виявлення. Ця ймовірність визначається енергетичними можливостями щодо прийому інформації про об'єкт і можливостей виявлення інформації щодо сигналу на фоні шумових завад різної природи. Враховуючи вищевикладене можна зазначити, що параметрами, які оцінюють

точність визначення координат джерел радіовипромінювання є ймовірність правильного виявлення джерела радіовипромінювання на вході радіоприймальної апаратури станції радіомоніторингу при заданому рівні ймовірності хибного виявлення та радіусом середньої квадратичної похибки місцеположення. Враховуючи те, що при одночасному прийомі сигналів від декількох джерел випромінювання потрібно прийняти рішення про їх наявність (або відсутність), третім показником, що характеризує ефективність функціонування системи радіомоніторингу є ймовірність не розрізнення між собою двох і більше джерел.

Аналіз існуючих підходів щодо оцінки ймовірності правильного виявлення і радіусу середньоквадратичної похибки координати в умовах поширення сигналу в атмосфері і многократному перевідбитті показує, що всі існуючі моделі спираються на так звану, теорію фазового екрану із застосуванням методу параболічних рівнянь:

$$F_1 = \sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0$$

$$F_2 = \sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} + D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_R \cdot c = 0$$

$$F_3 = \sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} + D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0$$

де x_1, x_2, x_3 - координати джерела радіовипромінювання, $x_{1L}, x_{2L}, x_{3L}; x_{1R}, x_{2R}, x_{3R}; x_{1Q}, x_{2Q}, x_{3Q}$ - координати станцій радіомоніторингу L,R і Q відповідно; τ - затримка часу надходження сигналу до відповідних станцій комплексу; c – швидкість поширення сигналу.

Квадратичний функціонал, що оцінює величину сумарної похибки системи пасивної радіолокації має вигляд:

$$J(x_1, x_2, x_3) = (x_3 - h)^2 + \sum_{j=1}^3 \left[\sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_i \cdot c \right]^2$$

Точка мінімуму квадратичного функціоналу буде відповідати координатам джерела радіовипромінювання, а отже задача зводиться до необхідності знаходження мінімуму означеної функції.

Таким чином зазначений квадратичний функціонал складається з суми квадратичних функцій, що враховують затримки часу надходження сигналу на приймальні станції постів радіомоніторингу з координатами джерела радіовипромінювання.

В той же час з експериментальних даних відомо [2], що при зміні фазових співвідношень спостерігається зменшення оцінки дисперсії флуктуації фазового фронту хвилі, що жодним чином не враховується в існуючих методиках. Неврахування цього чинника, особливо для ситуації значних величин еліпсу помилок для систем радіомоніторингу при застосуванні різницево-дальномірних методів визначення місцеположення дає суттєве заниження точнісних характеристик визначення координат джерел радіовипромінювання. Вимоги підвищення точності визначення координат диктуються необхідністю ведення одночасного прийому декількох частотно-нерозрізняних джерел радіовипромінювання по боковому випромінюванню з високою чутливістю рознесеними в просторі приймачами радіосигналів. Підвищення чутливості призводить до появи на вході станцій інтенсивних енергетичних потоків, що являють собою суміш сигналів і завад в яких накладаються між собою частотно-часові параметри. Це призводить до пропуску сигналів або виявленню хибних оцінок контрольованих параметрів, а також переплутуванню корисних сигналів, що потрапляють в зону здійснення радіомоніторингу.

Задача розрізнення двох детермінованих джерел радіовипромінювання зазвичай зводиться до вимоги не певному інтервалі спостереження розрізнити сигнали двох джерел, тобто по прийнятій реалізації найкращим чином прийняти рішення про те, що являє собою сигнал на вході (один, чи декілька) і надати оцінку теоретично можливих граничних якісних показників системи щодо можливості розрізнення.

Етапу оцінки точності визначення координат джерела радіовипромінювання передують етап енергетичного виявлення, який характеризується ймовірністю правильного виявлення сигналу. Причому математична модель оцінки ймовірності правильного виявлення сигналу

системою радіомоніторингу повинна враховувати не лише енергетичних параметрів, стану атмосфери, зміни взаємного розташування у просторі в горизонтальній і вертикальній площині джерел радіовипромінювання, але й просторових змін дисперсії флуктуації фазового фронту хвилі на вході приймальної станції радіомоніторингу.

Зазвичай математична модель розрізнення двох джерел припускає, що апріорні ймовірності появи сигналів від окремих джерел відомі і однакові (0,5). Енергетичні характеристики і частоти сигналів співпадають. Якщо коливання на вході приймальної станції є сумою завади і одного з сигналів, що розрізняються лише кутами приходу (тобто з різних напрямків), то прийнятій реалізації потрібно найкращим чином прийняти рішення про те, який з сигналів прийнятий і надати оцінку теоретично граничним якісним показникам системи. Відношення правдоподібності показує наскільки гіпотеза при прийнятому сигналі з одного напрямку перевищує гіпотезу щодо приходу цього ж самого сигналу з іншого напрямку. Таким чином можливість розрізнення двох детермінованих джерел радіовипромінювання по куту надходження сигналу дозволяє по знаку функції кореляції прийнятого коливання з різницею кутів приходу прийняти рішення про те, який з сигналів присутній на вході.

Зростання ймовірності не розрізнення джерел радіовипромінювання після обробки вхідної інформації, може бути викликано як мінімум з двох причин: при збільшенні неоднорідностей атмосфери дисперсія флуктуації фазового фронту хвилі зростає, що призводить до звуження смуг когерентності, відповідно зростають енергетичні втрати. Таким чином дифракційні спотворення і частотно-селективні завмирання призводять до зменшення амплітуди «піку» огинаючої напруги на виході системи обробки сигналу, а значить, і до зменшення відношення сигнал/шум. А по-друге спостерігається звуження ефективної ширини спектру сигналу і, відповідно до зменшенню «гостроти» зазначеного піку напруги на виході приймальної станції. Ці два фактори призводять до необхідності розрізняти між собою «згладжені» піки огинаючих двох сигналів, що в свою чергу, призводить до зростання ймовірності не розрізнення двох сигналів.

Ймовірність не розрізнення двох детермінованих частотно-неподільних джерел радіовипромінювання при здійсненні радіомоніторингу залежить від стану атмосфери, відстані між цими джерелами, розмірів вимірювальної бази, величини кутів надходження фронтів хвилі, та частотних і енергетичних параметрів зазначених джерел радіовипромінювання, які постійно змінюються в часі. Отже ймовірність не розрізнення джерел радіовипромінювання є функцією часу. А, значить, і радіус середньоквадратичної похибки оцінки координат в реальному масштабі часу постійно змінюється і залежить від геомагнітних умов, стану атмосфери та затримки приходу сигналу на вхід станції. Залежності радіусу від енергетичних і частотних характеристик демонструють тенденцію до його зменшення при зростанні потужності джерела і частоти випромінювання. Враховуючи це напрошується висновок про те, що підвищення точності визначення координат джерел радіовипромінювання вимагає раціонального вибору смуг робочих частот, потужності передавачів, а також використання сигналів, що займають якомога вузьку смугу частот. Ймовірність не розрізнення двох сигналів залежить від ефективної ширини смуги частот і збільшується при її зростанні.

Якщо уявити, що по двом координатам похибки відсутні (нехай це буде в горизонтальній площині), а неточності присутні лише по висоті, то обрахунки впливу цієї одної складової на загальний результат залежать від величини цієї похибки.

В роботі [3] показано, що оцінка параметра дальності при зростанні похибки визначення висоти несуттєві і, в більшості випадків, не перевищують технічно допустимий поріг в 4%. В цій же роботі показано, що у випадку наявності похибок виміру по всім вимірам, тобто те, що і зустрічається на практиці, то виявляється, що система пасивної локації демонструє надзвичайну чутливість щодо точності виміру часу приходу сигналу на вхід станції. Навіть невеличкі похибки виміру часу призводять до значних похибок виміру координат джерел радіовипромінювання. Причому основною вразливою стороною виступає саме висота.

Координати в горизонтальній площині не так значущо відхиляються від свого істинного значення, але їх відхилення теж помітні. Похибки визначення часу приходу сигналу на вхід приймального засобу в межах 1% призводять до похибки визначення висоти джерела радіовипромінювання до 25-30%.

Додаткова можливість отримання інформації щодо висоти джерела радіовипромінювання дозволяє враховувати похибки виміру часу затримки надходження сигналу на кожну зі станцій, і, як наслідок, аналізувати вплив цієї похибки на точність обчислення координат джерел радіовипромінювання комплексом пасивного радіомоніторингу.

Визначення координат при цьому буде відбуватись шляхом пошуку мінімуму квадратичного функціоналу з використанням методів статистичних випробувань (так звані численні методи). При цьому обчислювалися статистичні характеристики математичних сподівань по всіх вимірах (довжина, ширина, висота та дальність), дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії та ексцес. Останні дві характеристики обчислювалися для того, щоб оцінити наближення отриманих характеристик до гаусовського розподілу. Всі зазначені параметри формуються із виборки координат, що отримуються в результаті мінімізації квадратичного функціоналу. Вхідними даними для нього виступають випадкові значення затримок приходу сигналів на приймальні пристрої станцій [4, 5].

Інструментальні похибки комплексу вважають розподіленими за гаусовським законом. Результати статистичного моделювання (рис. 1) дозволяють зробити висновок, що при отриманні додаткової інформації по одному параметру (висоті).

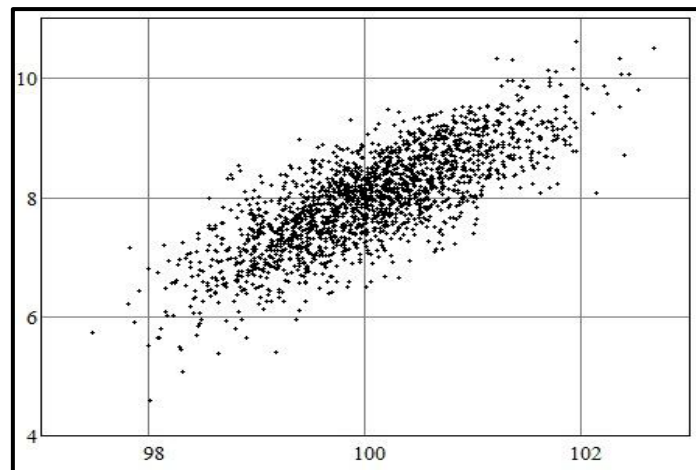


Рис. 1. Результати статистичного моделювання

Еліпс помилок в координатах з горизонтальної площини значно зменшується, а еліпс похибок в вертикальних площинах ($x_1;x_3$ і $x_2;x_3$) не тільки зменшуються в розмірах, але й змінюють своє розташування з уклінного на горизонтальне (рис. 2).

Тобто мала вісь еліпса при цьому співпадає з віссю висоти (вертикальна координата). При цьому середнє квадратичне відхилення зменшується майже в два рази. Середнє квадратичне відхилення по дальності зменшується аналогічно. Таким чином або зростає точність визначення координат при заданій достовірності, або можемо підвищити достовірність результату при заданій точності. Зменшення зазначених середніх квадратичних відхилень спостерігається навіть і тоді, коли інструментальні похибки комплексу перевищують середні квадратичні похибки визначення часу затримки приходу сигналу до кожної зі станцій. Значення математичних сподівань при цьому залишаються в тих же межах, тобто середні значення обчислених координат та дальності залишаються незмінними. Таким чином отримуємо незміщені оцінки. Оцінка дисперсії несуттєва, оскільки вона не містить більше інформації ніж середнє квадратичне відхилення.

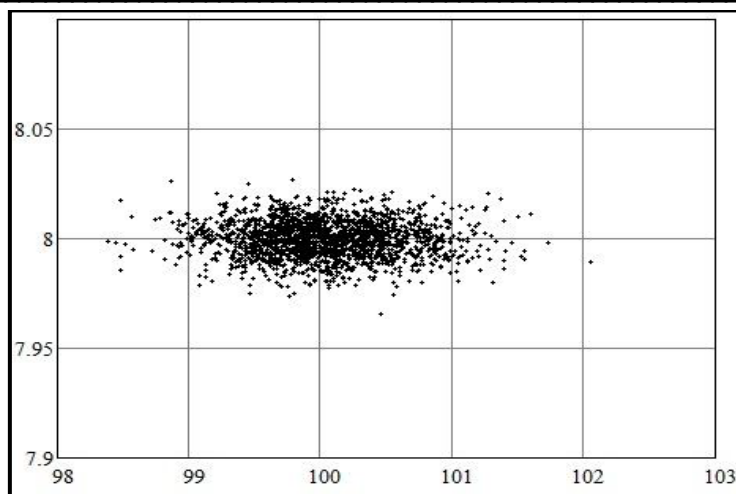


Рис. 2. Еліпс помилок в координатах з горизонтальної площини

Висновки

Асиметрія зменшилася майже на порядок, що дозволяє говорити про наближення розподілу похибок до гаусівського. Ексцес також зменшився на порядок. Тобто отримали більш гостровершинний розподіл, а значить можна говорити про більш точне визначення оцінок координат джерел радіовипромінювання при здійсненні радіомоніторингу. Одним із шляхів подальшого удосконалення систем радіомоніторингу є впровадження многопозиційних систем з різницево-дальномірним способом визначення місцеположення, що дозволяє реєструвати сигнал малої тривалості.

Список використаної літератури

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Сергиенко А.Р., Носимые средства автоматизированного радиомониторинга. - Специальная техника № 4, М. 2004 г.
2. Тамбиева Д.Т., Гусева Л.Л. Решение задач радиомониторинга // Современные наукоемкие технологии. – 2006. – №6. – С. 63-64; URL:<https://www.top-technologies.ru>
3. Поздняков Е.К. Алгоритм расчета координат цели на основе измерения периода вращения РЛС / Поздняков Е.К., Пантеев Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.Н. // Материалы 16-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков, 2012. – Т. 3. - С. 134- 135.
4. Ткаченко В.Н. Повышение точности определения координат ИРИ пассивными системами при помощи измерения периода вращения АФС РЛС / Ткаченко В.Н., Коротков В.В, Поздняков Е.К. // Сборник статей «Радиотехника». – 2012. - №170. – С. 162-169.
5. Shilyaeva O.L. Radiation patterns of antennas beyond line-of-sight and errors of transmitter position finding in multistatic systems / Shilyaeva O.L., Petrov V.A., Tkachenko V.N., Korotkov V.V., Pozdnyakov E.K. // Тезисы IX International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'2013, Odessa, 16-20 September 2013. – 2013. – С. 154-156

Автори статті

Малюженко Михайло Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних технологій Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

Лободін Дмитро Владиславович – студент Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Maliuzhenko Michailo Viktorovich - candidate of Science (technic), associate professor of Department of telecommunications technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Lobodin Dmitro Vladislavovich – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 24.10.2018 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Ю.В. Мельник