

УДК 628:331.45

САННИКОВ В.Ю., КІВА І.Л.
Київський національний університет технологій та дизайну

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ СПЕКТРА НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета. Оптимізація способу дослідження розподілу спектральної щільності потужності надвисокочастотних електромагнітних випромінювань із суцільним спектром.

Методика. Використано елементи теорії надвисокочастотного випромінювання, спектрального аналізу, теоретичні основи електротехніки та електроніки для розробки схемотехнічної структури аналізатору спектра НВЧ випромінювання.

Результати. Завдяки використанню двократного перетворення частот електромагнітного випромінювання, що приймаються антеною, і виділення інформативного сигналу другої проміжної частоти вибірково підсилювачем, що не переналаштується по частоті, забезпечується постійність смуги аналізу в широкому діапазоні частот складових спектру, що аналізується.

Наукова новизна. Вперше запропоновано введення в існуючі методи аналізу спектральної щільності потужності надвисокочастотних електромагнітних випромінювань додаткової операції змішування виділених коливань різницевої частоти з монохроматичними коливаннями додаткового високочастотного (ВЧ) гетеродина, що дозволяє здійснювати другу ступень перетворення частоти в напрямку її зниження.

Практичне значення. Використання запропонованого способу в контрольно-вимірній техніці дозволить проводити радіометричний контроль складу і властивостей матеріалів та виробів на досить коротких (міліметрових) довжинах хвиль, з можливістю підвищення роздільної здатності контролю.

Ключові слова: радіометричний контроль, електромагнітне випромінювання, антена, аналізатор спектру, спектральна щільність, гетеродин.

Вступ. Аналіз надвисокочастотних (НВЧ) електромагнітних випромінювань, прийнятих антеною, звичайно виконують шляхом змішування прийнятих коливань з монохроматичними коливаннями НВЧ гетеродина, частота якого переналаштується в діапазоні виділених спектральних складових [1]. Однак, при аналізі НВЧ сигналів з суцільним спектром виникають великі похибки від дзеркальних перешкод, які виникають із-за потрапляння в смугу пропускання тракту проміжної частоти складових від сусідніх з гетеродином ділянок спектру, який аналізується, та додаткові перешкоди від власних шумів антени і елементів НВЧ тракту, які є співрозмірними з сигналом, що досліджується.

Відомий спосіб вимірювання спектра низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання [2], заснований на виділенні із аналізованого спектру вузької ділянки частот за допомогою хвилеводного смугового фільтра, встановлені частоти НВЧ гетеродина на частоту віділеної ділянки спектра, яка зміщена на значення частоти налаштування вузькосмугового підсилювача проміжної частоти, з наступним квадратичним перетворенням сигналу проміжної частоти і вимірювані різниці напруг від прийнятого антеною сигналу і сигналу від еквівалента антени.

Однак, необхідність переналаштування двох вузькосмугових НВЧ елементів (смугового хвилеводного фільтра і монохроматичного гетеродина) зі збереженням постійної

різниці налаштованих частот ускладнює здійснення спектрального аналізу електромагнітних випромінювань з високою точністю у широкому діапазоні НВЧ.

В способі вимірювання спектра низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання [3] із надвисокочастотних сигналів антени і її еквівалента почергово з низькою частотою виділяють широкосмугові ділянки спектрів фільтром верхніх частот, які змішують з монохроматичними коливаннями надвисокочастотного гетеродина, частоту якого обирають фіксованою, із змішаних коливань виділяють широку смугу різницевих частот фільтром нижніх частот та визначають спектральну щільність потужності. Вимірювання спектральних складових НВЧ сигналу здійснюється переналаштуванням частоти вибіркового підсилювача проміжної частоти. Однак, у вибіркового підсилювачі зміна частоти налаштування завжди викликає зміну його смуги пропускання. Тому виконати послідовний спектральний аналіз з постійною шириною смуги пропускання важко. Виключити виникаючу при цьому похибку вимірювання від зміни смуги пропускання практично неможливо.

Постановка завдання. Задачею способу вимірювання спектру низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання являється підвищення точності спектрального аналізу і спрощення схемотехнічної реалізації способу, що пропонується, за рахунок створення нових методів обробки інформаційних сигналів НВЧ випромінювання.

Об'єкти та методи дослідження. Об'єктом дослідження є способи вимірювання спектра низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання з використанням гетеродинних методів перетворення сигналів.

Результати та їх обговорення. Задача підвищення точності спектральної оцінки вирішується тим, що із надвисокочастотних сигналів антени і її еквівалента почергово з низькою частотою виділяють широкосмугові ділянки спектрів фільтром верхніх частот, які змішують з монохроматичними коливаннями надвисокочастотного гетеродина, частоту якого обирають фіксованою, із змішаних коливань виділяють широку смугу різницевих частот фільтром нижніх частот та визначають спектральну щільність потужності, додатково змішують почергово виділені коливання різницевих частот з монохроматичними коливаннями додаткового високочастотного гетеродина, частоту якого послідовно змінюють від частоти зрізу фільтра нижніх частот до її подвоєного значення, із змішаних коливань виділяють сигнали фіксованої проміжної частоти вибірково підсилювачем, налаштованим на частоту зрізу фільтра нижніх частот, почергово квадратують виділені сигнали фіксованої проміжної частоти і з їх часової послідовності виділяють змінну складову напруги низької частоти переключення надвисокочастотних сигналів, по якій визначають спектральну щільність потужності виділеної складової спектра, а по частоті налаштування надвисокочастотного гетеродина і по частоті налаштування додаткового високочастотного гетеродина судять про її частоту [4].

На рис.1 представлена функціональна схема вимірювання спектра низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання; на рис. 2 – епюри коливань виділених частот складових спектру в процесі вимірювальних перетворень.

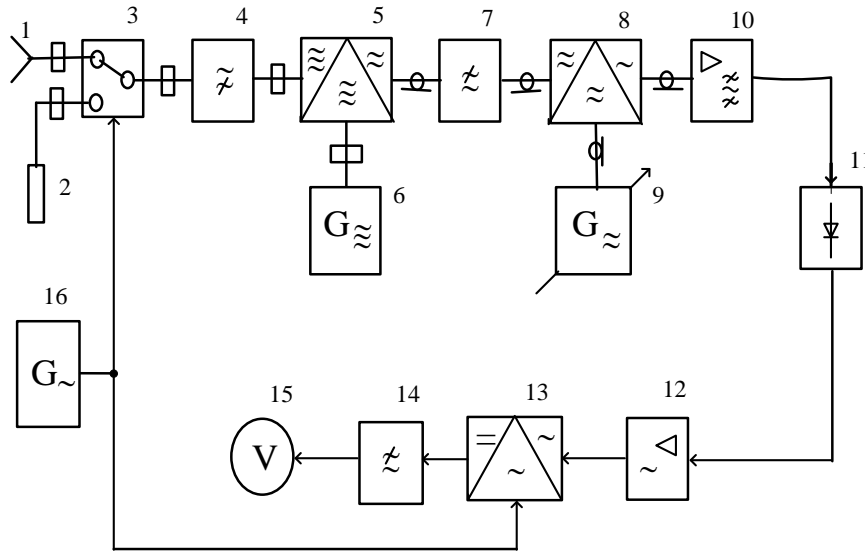


Рис. 1. Функціональна схема вимірювання спектра низькоінтенсивного НВЧ випромінювання:

1-антена; 2-еквівалент антени; 3-хвильоводний автоматичний перемикач; 4-фільтр верхніх частот; 5-надвисокочастотний (НВЧ) змішувач; 6-монохроматричний НВЧ гетеродин; 7-високочастотний (ВЧ) фільтр низьких частот; 8-ВЧ змішувач 9-ВЧ гетеродин регульованої частоти; 10-вибірковий підсилювач фіксованої проміжної частоти; 11-квадратичний детектор; 12-підсилювач низької частоти; 13-фазочутливий випрямляч, 14-фільтр нижніх частот 15-вольтметр; 16-генератор низької частоти

Спосіб вимірювання спектра низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання здійснюється наступним чином. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ), що аналізується,

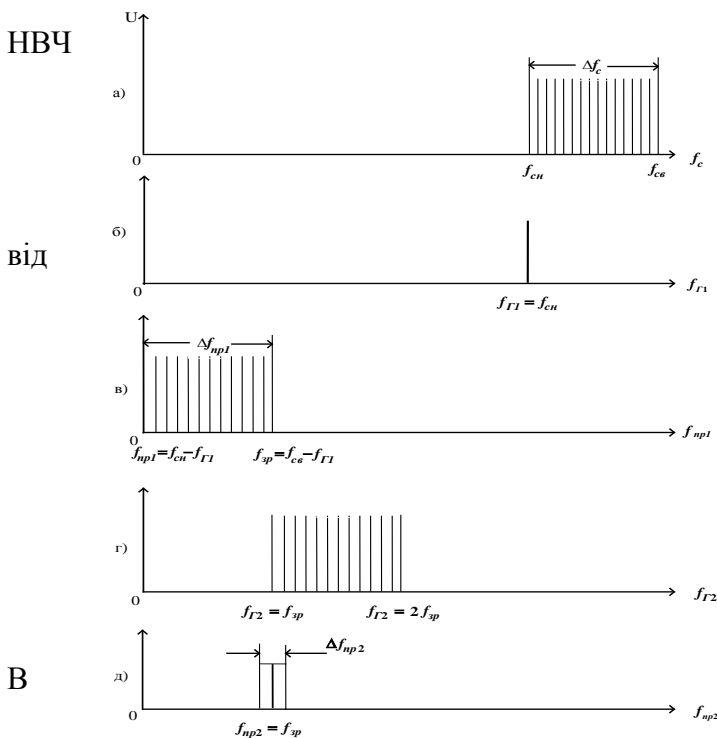


Рис.2 - Епюри коливань виділених частот складових спектру

приймається антеною 1 і у вигляді сигналу надходить на один вхід хвильоводного автоматичного перемикача 3. На другий вхід хвильоводного автоматичного перемикача 3 надходить НВЧ сигнал еквівалента 2, який виконаний у вигляді кінцевого хвильового навантаження, шуми якого відповідні шумам антени 1. Хвильоводний автоматичний перемикач 3 керується напругою генератора 16 низької частоти. Обидва НВЧ сигнали по чергово з низькою частотою перемикачання проходять через хвильоводний фільтр 4 верхніх частот. якості НВЧ фільтра верхніх частот можуть бути використані відрізки

хвилеводів, внутрішні розміри яких забезпечують необхідний діапазон частот виділеної ділянки спектра ЕМВ, який аналізується. Так хвилевод з розмірами (3,6×1,8)мм має смугу прозорості (53,6 – 78,3)ГГц, а хвилевод з розмірами (2,4×1,2)мм відповідно (78,3 – 118,1)ГГц. Сигнал, що пройшов крізь фільтр 4 верхніх частот НВЧ коливань з шириною Δf_c в діапазоні частот від нижньої f_{c1} до верхньої f_{c2} (рис.2,а), потрапляє в НВЧ змішувач 5, де змішується з монохроматичними коливаннями НВЧ гетеродина 6, який має фіксовану частоту налаштування $f_{Г1}$ (рис.2,б).

Частоту НВЧ гетеродина вибирають рівною нижній частоті f_{c1} смуги пропускання хвилеводного фільтра 4 верхніх частот $f_{Г1} = f_{c1}$. В результаті змішування виділених НВЧ коливань утворюються більш низькочастотні високочастотні (ВЧ) коливання різницевої частоти, які утворюють спектр коливань першої проміжної частоти Δf_{np1} (рис.2,в). Так як всі проміжні частоти утворюються з НВЧ сигналів вищої частоти гетеродина $\Delta f_c > f_{Г1}$ (рис.2,а і б), то в процесі змішування не утворюються дзеркальні перешкоди з складових спектру ЕМВ менших частот гетеродина 6, які подавляються хвилеводним фільтром 4 верхніх частот. Всі ВЧ коливання першої проміжної частоти ($f_{np1} = f_c - f_{Г1}$) виділяють високочастотним фільтром 7 нижніх частот, верхню частоту проходження якого (частоту зрізу $f_{сд}$) вибирають рівною різницевої частоті, яка утвориться із найбільшої частоти f_{c2} смуги частот, які виділяються фільтром верхніх частот 4, гетеродина $f_{Г1}$ ($f_{сп} = f_{c2} - f_{Г1}$) (рис.2,в). Спектри різницевої частоти $\Delta f_{ід1}$ формуються як із НВЧ сигналу антени 1, так і з НВЧ сигналу еквівалента антени 2. Однак в часі вони прив'язані до різних півперіодів роботи хвилеводного автоматичного перемикача 3.

Широкопasmові ВЧ сигнали різницевої частоти (першої проміжної частоти) по чергово змішують у високочастотному змішувачі 8 з монохроматичними коливаннями ВЧ гетеродина 9, частоту налаштування якого $f_{Г2}$ послідовно змінюють від частоти зрізу високочастотного фільтра 7 нижніх частот $f_{сп}$ до її подвоєного значення $2f_{сп}$ (рис.2,г). Із змішаних коливань виділяють коливання фіксованої другої проміжної (різничевої) частоти $f_{np2} = f_{Г2} - f_{np1}$, на яку налаштований вибіркового підсилювач 10 другої проміжної частоти. При цьому вибіркового підсилювач 10 налаштований на частоту зрізу фільтра нижніх частот 7 ($f_{np2} = f_{сп}$) (рис.2,д). Так, при змішуванні коливань найбільшої різницевої частоти $f_{ід2} = f_{c2} - f_{Г1}$ в спектрі різницевої частоти (рис.2,в) з подвоєним значенням частоти гетеродина 9 $f_{Г2} = 2f_{сп}$ (рис.2,г) утвориться різницева частота $f_{np2} = f_{сп}$, яка і виділяється вибіркового підсилювачем 10. Послідовним зменшенням частоти ВЧ гетеродина 9 від подвоєного значення ($2f_{Г2}$) до початкового значення ($f_{Г2}$) виділяються складові другої проміжної частоти $f_{np2} = f_{Г2} - f_{np1} = f_{сп}$ з більш низькочастотних складових спектру різницевої частоти (рис.2,в і д) повністю до нульового значення різницевої частоти $f_{ід1} = f_{іт} - f_{Г1}$. Так, як частота налаштування вибіркового підсилювача 10 не змінюється, то і смуга його пропускання залишається незмінною в процесі спектрального аналізу ($\Delta f_{np2} = \text{const}$).

При повторному перетворенні частоти високочастотних різницевої коливань ($f_c - f_{Г1}$) частота ВЧ гетеродина 9 завжди більша частот коливань, що перетворюються, ($f_{Г2} > f_{np1}$). Відсутність симетричних більш високочастотних, відносно частоти $f_{Г2}$

гетеродина, складових спектра різницевих частот забезпечує і відсутність дзеркальних складових на другій проміжній частоті f_{np2} . Таким чином, завдяки вказаному вибору частот першого (НВЧ) і другого (ВЧ) гетеродинів, а також смуг пропускання фільтрів верхніх (ФВЧ) і нижніх (ФНЧ) частот повністю виключається дзеркальні перешкоди при перетворенні частоти ЕМВ з суцільним спектром. При цьому переналаштованим по частоті елементом являється тільки один другий додатковий більш низькочастотний гетеродин. Ширина смуги аналізу Δf_{np2} зберігається постійною у всьому діапазоні частот виділеної ділянки НВЧ спектру.

При періодичній роботі хвилеводного автоматичного перемикача 3 на виході вибіркового підсилювача 10 формуються імпульси напруги з коливань другої проміжної частоти, які надходять з низькою частотою. Ці імпульси детектуються квадратичним детектором 11 і усереднюються ємністю цього детектора. Амплітуда одного з імпульсів пропорційна спектральній щільності потужності аналізованої ділянки спектру ЕМВ з доданими спектральними щільностями потужності власних шумів антени 1 та шумів НВЧ і ВЧ трактів. Амплітуда другого імпульсу пропорційна лише спектральній щільності потужності шумів еквівалента 2 (які дорівнюють шумам антени 1) та шумів НВЧ і ВЧ трактів перетворення сигналів. В послідовності імпульсів із-за їх нерівності присутня низькочастотна огинаюча, яка виділяється в процесі квадратичного детектування у вигляді напруги низької частоти перемикання НВЧ сигналів. Виділена квадратичним детектором 11 змінна складова напруги підсилюється підсилювачем низької частоти 12 і випрямляється фазочутливим випрямовувачем 13, який керується напругою генератора 16 низької частоти. Випрямлена напруга є пропорційною тільки спектральній щільності потужності спектру ЕМВ незалежно від рівня власних шумів вимірювальної схеми. Ця напруга згладжується фільтром 14 нижніх частот і вимірюється вольтметром 15.

Аналіз спектра ЕМВ починається з налаштування частоти ВЧ гетеродина 9 $f_{Г2}$ на частоту зрізу $f_{зп}$ високочастотного фільтра 7 нижніх частот ($f_{Г2} = f_{сд}$). В цьому випадку найбільш низькочастотні складові спектру першої проміжної частоти f_{np1} (рис.2,в), які знаходяться близько початку смуги пропускання фільтру нижніх частот 7, попадають в смугу пропускання Δf_{np2} вибіркового підсилювача 10 другої проміжної частоти (рис.2,д) $f_{np2} = f_{Г2} - f_{np1} = f_{зп}$. Подальше збільшення частоти $f_{Г2}$ в напрямку її подвоєння приводить до попадання в смугу Δf_{np2} більш високочастотних складових із спектру проміжної частоти (рис.2,в). Оскільки спектр першої проміжної частоти формується зі спектру НВЧ ЕМВ (рис.2,а), то послідовне переналаштування частоти другого гетеродина 9 в діапазоні від $f_{Г2}$ до $2f_{Г2}$ дозволяє виділити і виміряти спектральну щільність потужності всіх складових спектру ЕМВ в смузі частот від частоти $f_{сн}$ до частоти $f_{св}$ (рис.2,а), з яких за допомогою НВЧ гетеродина 6 (рис.2,б) формуються сигнали першої проміжної частоти. Значення спектральної щільності потужності складових спектру ЕМВ визначають за показаннями вольтметра 15, а частоту виділеної складової спектру ЕМВ з відношення:

$$f_c = f_{A1} + f_{A2}'' - f_{A2}', \quad (1)$$

де: $f_{Г2}' = f_{зп}$ - початкова частота ВЧ гетеродина 9;

$f_{Г2}''$ - встановлена в процесі аналізу частота ВЧ гетеродина 9.

За результатами вимірювань потужності і частоти спектральних складових можна визначити огинаючу спектру ЕМВ на ділянці спектру, що аналізується, і оцінити його нерівномірність.

Висновки. Завдяки використанню двократного перетворення частот ЕМВ, що приймаються антеною, і виділення інформативного сигналу переналаштовувемим по частоті вибірково підсилювачем другої проміжної частоти, забезпечується постійність смуги аналізу в широкому діапазоні частот складових аналізованого спектру. При цьому переналаштовується по частоті тільки другий більш низькочастотний гетеродин, а інші елементи, хвилеводний фільтр і НВЧ гетеродин, мають фіксовані налаштування частоти та смуги пропускання. Так, при аналізі спектра НВЧ випромінювання в хвилеводному міліметровому діапазоні (55 - 65ГГц) частота першого НВЧ гетеродина буде обрана фіксованою (55ГГц), а частоту другого ВЧ гетеродина необхідно буде переналаштовувати в коаксіальному діапазоні частот 10 – 20ГГц, що можливо зробити за допомогою стандартного генератора сантиметрового діапазону. В результаті цього значно спрощується схематична реалізація способу і досягається підвищення точності спектрального аналізу за рахунок виключення впливу дзеркальних перешкод, що виникають при перетворенні частот з двома елементами, характеристики яких переналаштовуються під час аналізу. Виділення різниці сигналів від антени та її еквіваленту дозволяє виключити вплив на результат вимірювання власних шумів НВЧ і ВЧ трактів, що сорозмірні зі слабкими низькоінтенсивними вимірювальними сигналами.

Список використаних джерел

1. Суслов А.И. Перспективы использования на судах радиотеплолокаторов в современных условиях судоходства / А.И.Суслов // Вестник МГТУ. – Т.12, №2, - 2005, - С.239-249.
2. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии. / [Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф. та ін.]– Донецк: ППШ «Наука і освіта», 2011. – 324с.
3. Патент на корисну модель 75336 Україна, МПК G01S 13/00, Спосіб вимірювання спектра низько інтенсивного електромагнітного випромінювання / Скрипник Ю.О., Яненко О.П., Куценко В.П., Березянський Б.М. ; власник Скрипник Ю.О., Яненко О.П., Куценко В.П., Березянський Б.М. (UA). - № u201206455; заяв. 28.05.2012; опуб. 26.11.2012 Бюл. пром. влас., – №22/2012р.
4. Патент на корисну модель 83432 Україна, МПК G01S 13/00, Спосіб вимірювання спектра низько інтенсивного електромагнітного випромінювання / Скрипник Ю.О., Санніков В.Ю., Потапов А.О.; власник Київський національний університет технологій та дизайну. – №u201303373 заяв. 19.03.2013; опуб. 10.09.2013 Бюл. пром. влас., – №17/2013р.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Ю.САННИКОВ, І.Л.КІВА

Київський національний університет технологій та дизайну

Цель. Оптимизация способа исследования распределения спектральной плотности мощности сверхвысокочастотных электромагнитных излучений со сплошным спектром.

Методика. Используются элементы теории СВЧ излучения, спектрального анализа, теоретические основы электротехники и электроники для разработки схемотехнической структуры анализатора спектра СВЧ излучения.

Результаты. Благодаря использованию двукратного преобразования частот электромагнитного излучения, принимаемых антенной, и выделение информативного

сигнала второй промежуточной частоты выборочным усилителем, который не перенастраивается по частоте, обеспечивается постоянство полосы анализа в широком диапазоне частот составляющих спектра, который анализируется.

Научная новизна. Впервые предложено введение в существующие методы анализа спектральной плотности мощности сверхвысокочастотных электромагнитных излучений дополнительной операции смешивания выделенных колебаний разностных частот с монохроматическими колебаниями дополнительного высокочастотного (ВЧ) гетеродина, что позволяет осуществлять вторую ступень преобразования частоты в направлении ее снижения.

Практическое значение. Использование предлагаемого способа в контрольно-измерительной технике позволит проводить радиометрический контроль состава и свойств материалов и изделий на достаточно коротких (миллиметровых) длинах волн, с возможностью повышения разрешения контроля.

Ключевые слова: радиометрический контроль, электромагнитное излучение, антенна, анализатор спектра, спектральная плотность, гетеродин.

METHOD OF MEASUREMENT OF THE SPECTRUM OF LOW INTENSITY ELECTROMAGNETIC RADIATION

SANNIKOV V., KIVA I.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Optimization method of investigating the distribution of the power spectral density of microwave electromagnetic radiation with a continuous spectrum.

Methodology. We used elements of the theory of microwave radiation, the spectral analysis, the theoretical foundations of electrical engineering and electronics for the development of circuit structure of the spectrum analyzer microwave.

Findings. By using a double frequency conversion of the electromagnetic radiation received by the antenna, and isolating informative signal of the second intermediate frequency selective amplifier which is not reconfigured by frequency analysis is provided by the constancy of the band over a wide frequency spectrum components to be analyzed.

Originality. First proposed the introduction of the existing methods of analyzing the spectral power density of microwave electromagnetic radiation more blending operations selected oscillation frequency difference from monochromatic vibrations of additional radio frequency (RF) oscillator, which allows the second stage of the frequency conversion in the direction of its reduction.

Practical value. The use of the method in test and measurement technology will allow for radiometric control of composition and properties of materials and products at a fairly short (millimeter) wavelengths, with the possibility of increasing the resolution of control.

Keywords: radiometric control, electromagnetic radiation, antenna, spectrum analyzer, spectral density, a local oscillator.