

УДК 621.317.39

В.П.Кущенко (д-р техн. наук, старш. наук. співроб.)¹, К.Л.Шевченко (канд. техн. наук, доц.)²¹Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ
кафедра автоматики та телекомунікацій²Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ
кафедра автоматизації та комп'ютерних систем
E-mail: donetsk50@mail.ru; autom1@meta.ua

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ПОТУЖНОСТЕЙ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Запропоновано для вимірювання різниці потужностей слабких НВЧ-електромагнітних випромінювань на тлі інтенсивних шумів використовувати диференціальні модуляційні радіометричні системи в бездетекторному варіанті. Показано, що чутливість бездетекторної схеми радіометричної системи покращується в 3 – 4 рази порівняно з детекторною схемою, і в 2 – 2,5 рази порівняно з супергетеродинним перетворенням частоти НВЧ-сигналів. Рівень корисного шумового сигналу знизився з 10 – 30% від потужності внутрішніх шумів схеми диференціальної модуляційної радіометричної системи до 0,05 – 0,10%.

Ключові слова: вимірювання, НВЧ-електромагнітні випромінювання, диференціальні модуляційні радіометричні системи, підвищення точності, різниця потужностей.

Вступ. При вимірюванні різниці інтенсивностей слабких електромагнітних випромінювань (ЕМВ) доводиться з власних шумів радіометричної системи (РС) виділяти сигнал, пропорційний різниці потужностей слабких сигналів, тобто практично вимірювати дуже слабкий сигнал на тлі інтенсивних шумів. Ця задача вирішується як РС прямого підсилення і детектування, так і РС із супергетеродинним перетворенням частоти прийнятих сигналів і наступним підсиленням на проміжній частоті [1-3]. Однак чутливість таких пристроїв недостатня для достовірного вимірювання різниці інтенсивностей двох НВЧ-сигналів низькоінтенсивних рівнів.

Для підвищення чутливості в модуляційні РС вводять додатний зворотний зв'язок за низькочастотною обвідною модульованого сигналу, що виділяється амплітудним детектором з перетвореного за частотою НВЧ-сигналу супергетеродинним приймачем [4-6]. Однак, через наявність у супергетеродинному приймачі крім основного «сигнального» каналу прийому і «дзеркального» каналу, ефективність додатного зворотного зв'язку невисока через перекручування сигналів проміжної частоти дзеркальними завадами.

Для виділення низькочастотної обвідної модульованого НВЧ-сигналу в модуляційних РС часто використовують квадратичний детектор (КД). Відомо, що КД нелінійний електронний вузол, і наявність на його вході корисного різницевого сигналу (сигналів від двох антен) і завади (власних шумів) приводить до такого ефекту, як заглушення завадою сигналу, якщо рівень завади перевищує рівень сигналу [7].

У диференціальної модуляційної РС співвідношення «сигнал – завада» на її вході значно менше одиниці (0,005 – 0,5). За таких умов КД серйозно обмежує його чутливість. Підвищення чутливості можна досягти або збільшенням смуги пропускання додетекторного тракту, або постійної часу інтегратора, що включений на виході детектора. Однак це не завжди доцільно через збільшення часу встановлення вихідної напруги РС і обмеженою смугою пропускання НВЧ-підсилювача на вході КД. [8]

Постановка задачі дослідження. У зв'язку із цим задачею є істотне підвищення чутливості і роздільної здатності, що підвищить точність вимірювання різниці потужностей

низькоінтенсивних ЕМВ за допомогою функціональної схеми диференціальної модуляційної РС в бездетекторному варіанті (див. рис. 1).

Основна частина. Вимірювальна антена X1 і опорна антена X2 з'єднані з входами комутаційно-модуляційного перемикача (КМП) S1, до виходу якого через підсилювач верхньої частоти (ПВЧ) A1 по одному входу підключений помножувач U1 НВЧ-сигналів. Генератор G2 НВЧ-шуму через смуговий НВЧ фільтр Z2 з'єднаний з іншим входом помножувача U1 сигналів, до виходу якого через фільтр нижніх частот (ФНЧ) Z1 підключений входом автоматичний низькочастотний перемикач S2. Керуючі входи автоматичного НВЧ перемикача S1 і КМП низької частоти S2 з'єднані між собою та підключені до генератора G1 низької частоти. Виходи КМП низької частоти S2 з'єднані з входами інтеграторів U2 і U3, виходи яких через диференціальний підсилювач A2 з'єднані з вольтметром P1 [9].

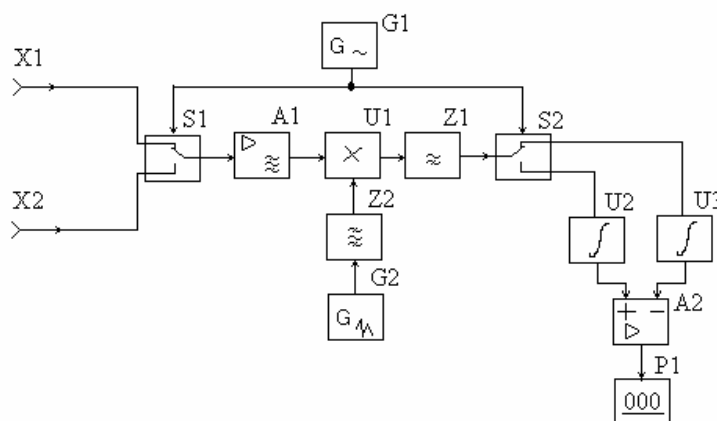


Рисунок 1 – Функціональна схема диференціальної модуляційної РС в бездетекторному варіанті

Диференціальна модуляційна РС працює таким чином. Електромагнітні випромінювання від порівнюваних об'єктів приймаються вимірювальною антеною X1 і опорною антеною X2. При прийомі низькоінтенсивних ЕМВ, наприклад, радіотеплового характеру, потужності корисних НВЧ-сигналів вимірювальної антени X1 і опорної антени X2 порівнянні або менше потужності власних шумів вимірювальної антени X1 і опорної антени X2. Тому на КМП S1 надходять сумарні сигнали потужністю

$$P'_C = P_{X1} + P_{шX1}; \quad (1)$$

$$P''_C = P_{X2} + P_{шX2}, \quad (2)$$

де P_{X1} і P_{X2} – потужності корисних сигналів вимірювальної антени X1 і опорної антени X2; $P_{шX1}$ і $P_{шX2}$ – потужності власних шумів вимірювальної антени X1 і опорної антени X2 спільно з КМП S1.

Сигнали з потужностями (1) і (2) по черзі впливають на вхід ПВЧ A1. Перемикання сигналів здійснюється напругою від генератора G1 низької частоти. В результаті цього на вхід ПВЧ A1 надходять сигнали у вигляді радіоімпульсів тривалістю у півперіод моделюючої низькочастотної напруги. Підсилені радіоімпульси з різною інтенсивністю (1) і (2) надходять на один вхід помножувача U1 НВЧ-сигналів, на другий вхід якого надходить безперервний сигнал від генератора G2 шуму через смуговий НВЧ-фільтр Z2. Центральну частоту смугового НВЧ-фільтра Z2 встановлюють рівною центральній частоті в спектрі підсиленних сигналів вимірювальної антени X1 і опорної антени X2 ПВЧ A1.

Помноження сигналів найчастіше здійснюють в мостових схемах з двома нелінійними елементами (діодами), які мають найменший рівень шумів порівняно з іншими нелінійними елементами. У НВЧ-діапазоні шуми напівпровідникового діода обумовлені шумами, пов'язаними з флуктуаціями струму, що протікає через p - n -перехід (дробовий шум), і тепловими шумами об'ємного опору діода. На діоди помножувача $U1$ сигналів, включених за схемою кільцевого перетворювача з відкритим виходом, подається сума і різниця помножуваних сигналів. В разі рівності центральної частоти смуги пропускання ПВЧ $A1$ і центральної частоти смугового НВЧ-фільтра $Z2$ можна вважати, що помножувані сигнали мають нормальні закони розподілу з обмеженим спектром і з однаковою граничною частотою. Хоча помножувані сигнали некорельовані між собою, вихідний сигнал помножувача $U1$ сигналів містить складові різницевої частоти і постійну складову, які виділяються ФНЧ $Z1$ з широкого спектра помножених НВЧ-сигналів. Вольт-амперна характеристика діода має вигляд:

$$I_d = I_0 \{ \exp(qU_d / kT) - 1 \} \quad (3)$$

де I_0 – струм насичення діода; q – заряд електрона.

Потужність постійної складової спектра вихідного сигналу помножувача $U1$ сигналів визначається виразом:

$$P_I = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \frac{(I_1 - I_2)(U_1 - U_2)}{\sigma_C \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{U_C^2}{2\sigma_C^2}\right) \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{U_G^2}{2\sigma_G^2}\right) dU_C dU_G, \quad (4)$$

де U_1 , U_2 і I_1 , I_2 – напруги та струми на нелінійному елементі (діодах); σ_C^2 і σ_G^2 – дисперсія помножуваного сигналу ПВЧ $A1$ та сигналу генератора $G2$ шуму.

Внесок НВЧ-шумів кожного з вказаних джерел в загальний низькочастотний шум за потужністю P можна оцінити із співвідношення:

$$P = K_1 \cdot \sqrt{(P'_C + P''_C + P_{A1} + P_{U1})} \cdot P_G, \quad (5)$$

де K_1 – коефіцієнт передачі за потужністю перетворювача частоти на основі помножувача $U1$ сигналів; P_{A1} – потужність власних шумів ПВЧ $A1$; P_{U1} – потужність власних шумів помножувача $U1$ сигналів; P_G – потужність генератора $G2$ шуму.

Вираз (5) визначає внесок власних шумів вимірювальної і опорної антен $X1$ і $X2$ спільно з КМП $S1$, ПВЧ $A1$, помножувача $U1$ сигналів разом з корисним шумовим сигналом (P_C) як в постійну складову спектра вихідної потужності помножувача $U1$ НВЧ-сигналів, так і в низькочастотні складові з різницевою частотою шумових НВЧ-сигналів.

Складові різницевої частоти утворюють низькочастотний шум, спектральну щільність якого в області нульової частоти можна знайти з кореляційної функції $B(\tau)$ помножуваних сигналів. Сукупність постійної складової і низькочастотних шумів утворюють відеоімпульси, які формуються ФНЧ $Z1$, і слідує з тією ж частотою, що й НВЧ-радіоімпульси. Послідовність відеоімпульсів, потужність яких згідно з (5) пропорційна потужностям (1) і (2) прийнятих вимірювальною антеною $X1$ і опорною антеною $X2$ ЕМВ, надходить на вхід КМП низької частоти $S2$. Оскільки КМП $S1$ і КМП низької частоти $S2$ керуються напругою від одного генератора $G1$ низької частоти, то вони працюють синхронно і синфазно. Завдяки цьому один відеоімпульс впливає на інтегратор $U2$, інший – на інтегратор $U3$. В процесі інтеграції заглушуються змінні (шумові) складові відеоімпульсів і виділяються їх

постійні складові. Напряга на виході інтегратора U_2 , відповідно до виразів (5) і (1), визначається за формулою:

$$U_1 = K_2 S \cdot (P_{X1} + P_{ШХ1} + P_{A1} + P_{U1}), \quad (6)$$

де K_2 – коефіцієнт передачі інтегратора U_2 ; S – крутизна перетворення НВЧ-потужності в напругу.

Вихідна напруга інтегратора U_3 набуває значення:

$$U_2 = K_3 S \cdot (P_{X2} + P_{ШХ2} + P_{A1} + P_{U1}), \quad (7)$$

де K_3 – коефіцієнт передачі інтегратора U_3 .

Крутизна перетворення S у виразах (6) і (7) визначається рівнем потужності генератора G_2 шуму і коефіцієнтом передачі за потужністю перетворювача частоти на основі помножувача U_1 НВЧ-сигналів. Підсилена різницева напруга на виході диференціального підсилювача A_2 при використанні однотипних інтеграторів U_2 і U_3 ($K_2 = K_3$) матиме вигляд

$$U_3 = K_3 K_4 S \cdot (P_{X1} + P_{ШХ1} - P_{X2} - P_{ШХ2}), \quad (8)$$

де K_4 – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача A_2 .

Якщо для прийому порівнюваних НВЧ-випромінювань використовувати однакові вимірювальну і опорну антени X_1 і X_2 ($P_{ШХ1} = P_{ШХ2}$), то підсилена різницева напруга:

$$U_4 = K_3 K_4 S \cdot (P_{X1} - P_{X2}). \quad (9)$$

Введенням узагальненого параметра – крутизни S_0 одноканального перетворення різницевої потужності двох ЕМВ в постійну напругу ($S_0 = K_3 K_4 S$), остаточно отримаємо:

$$U_5 = S_0 \cdot (P_{X1} - P_{X2}). \quad (10)$$

Вихідна напруга (10) диференціального підсилювача A_2 вимірюється вольтметром P_1 .

Як видно з виразу (10), показання вольтметра P_1 пропорційні різниці потужностей порівнюваних ЕМВ і не залежать від власних шумів вимірювальної антени X_1 , опорної антени X_2 , ПВЧ A_1 , помножувача U_1 НВЧ-сигналів. Завдяки відсутності в схемі КД виключається ефект заглушення корисного шумового сигналу від порівнюваних ЕМВ завадами у вигляді власних шумів НВЧ приймального тракту і перетворювача частоти на основі діодних кільцевих або балансних схем. В результаті підвищується чутливість до різницевої ЕМВ, знижується флуктуаційний поріг чутливості, який визначає мінімальну різницю потужностей двох незалежних ЕМВ, що може бути виявлена, і підвищується точність вимірювання слабких ЕМВ. Зниженню флуктуаційного порогу чутливості сприяє виключення зі схеми диференціальної модуляційної РС вибіркового підсилювача низької частоти (ПНЧ) та синхронного детектора (СД).

Річ у тому, що при вузькій смузі пропускання вибіркового ПНЧ, що необхідно для заглушення низькочастотних шумів, збільшуються флуктуації амплітуди напруги обвідної модульованого сигналу через нестабільність частоти генератора G_1 низької частоти. Синхронним детектором виділяються ці флуктуації у вигляді напруги інфранизьких частот, які різко знижують флуктуаційний поріг чутливості диференціальної модуляційної РС. Тому

виключення зі схеми диференціальної модуляційної РС як КД, так і СД істотно підвищує чутливість схеми, особливо в оточенні нульового значення вихідної напруги.

Таким чином, запропонована бездетекторна схема має підвищену чутливість і точність, що дозволяє виявляти і вимірювати малі градієнти ЕМВ. Дослідження показали, що чутливість бездетекторної схеми РС покращується в 3 – 4 рази порівняно з детекторною схемою, і в 2 – 2,5 рази порівняно з супергетеродинним перетворенням частоти НВЧ-сигналів. Рівень корисного шумового сигналу знизився з 10 – 30% від потужності внутрішніх шумів схеми диференціальної модуляційної РС до 0,05 – 0,10%. Вихідна напруга запропонованої РС більше на 25 – 30 дБ порівняно з детекторною схемою за рахунок підсилення диференціальним підсилювачем безпосередньо різниці постійних складових відеоімпульсів, які «засмічені» продуктами перетворення власних шумів з шумовими сигналами приймальних антен.

Висновки.

1. Завдяки відсутності в схемі КД виключається ефект заглушення корисного шумового сигналу від порівнюваних ЕМВ завадами у вигляді власних шумів НВЧ приймального тракту.

2. Зниженню флюктуаційного порогу чутливості сприяє виключення зі схеми диференціальної модуляційної РС вибіркового підсилювача низької частоти (ПНЧ) та синхронного детектора (СД).

3. Показано, що чутливість бездетекторної схеми РС покращується в 3 – 4 рази порівняно з детекторною схемою, і в 2 – 2,5 рази порівняно з супергетеродинним перетворенням частоти НВЧ-сигналів. Рівень корисного шумового сигналу знизився з 10 – 30% від потужності внутрішніх шумів схеми диференціальної модуляційної РС до 0,05 – 0,10%.

Перелік використаної літератури

1. Скрипник Ю.О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: [навч. посібник] / Ю.О. Скрипник, В.П. Манойлов, О.П. Яненко. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.
2. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, В.П. Манойлов, В.П. Куценко, Ю.Б. Гимпилевич. – Житомир: Волянь, 2003. – 408 с.
3. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Р.А. Валитов, В.Н. Скрасанов, А.И. Фисун [и др.], под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
4. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / В.П. Куценко, Ю.А. Скрипник, Н.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, А.Ф. Яненко. – Донецк: ІПШ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
5. Головка Д.Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин / Д.Б. Головка, Ю.О. Скрипник, О.П. Яненко. – К.: Либідь, 2003. – 328 с.
6. Куценко В.П. Радіометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / В.П. Куценко, Ю.О. Скрипник, М.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко. – Донецьк: ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.
7. Суслов А.Н. Перспективы использования на судах радиотеплолокаторов в современных условиях судоходства / А.Н. Суслов, А.Х. Пятси, Н.В. Калитёнков // Вестник МГТУ: труды Мурман. гос. техн. ун-та. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2009. – Т.12, № 2. – С. 239-249.
8. Куценко В.П. Періодичне порівняння сигналів в НВЧ-радіометрії / В.П. Куценко. – Донецьк: ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 300 с.
9. Скрипник Ю.А. Дифференциальный модуляционный радиометр / Ю.А. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.П. Куценко // Материалы 20-й международной конференции «СВЧ-

техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо – 2010). – Севастополь: Вебер, 2010. – С. 1005-1006.

References

1. Skripnik, Yu.O., Manoylov V.P. and Yanenko O.P. (2001), *Moduljacionni radiometrychni prystroi' ta systemy NVCh-diapazonu: [navch. posibnyk]* [Microwave modulation radiometric devices and systems], ZhITI, Zhitomir, Ukraine.
2. Skripnik, Yu.A., Yanenko A.F., Manoylov V.P., Kutsenko V.P. and Gimpilevich Yu.B. (2003), *Mikrovolnovaya radiometriya fizicheskikh i biologicheskikh ob'ektov* [Microwave radiometry of physical and biological objects], Volyin, Zhitomir, Ukraine.
3. Valitov, R.A., Skresanov V.N., Fisun A.I. and at. (1984), *Izmereniya na millimetrovyih i submillimetrovyih volnah* [Measuring on millimetric and submillimeter waves] in Valitov R.A. and Makarenko B.I., *Radio i svyaz*, Moscow, Russia.
4. Kutsenko, V.P., Skripnik Yu.A., Tregubov N.F., Shevchenko K.L. and Yanenko A.F. (2011), *Metody i sredstva sverhvyisokochastotnoj radiometrii* [Methods and means of microwave radiometry], IPShI “Nauka i osvita”, Donetsk, Ukraine.
5. Golovko, D.B., Skripnik Yu.O. and Yanenko O.P. (2003), *Sverhvyisokochastotnyie metody i sredstva izmereniya fizicheskikh velichin* [Super-high-frequency methods and facilities of measuring of physical sizes], Lebed, Kiev, Ukraine.
6. Kutsenko, V.P., Skripnik Yu.O., Tregubov M.F., Shevchenko K.L. and Yanenko O.P. (2012), *Radlometrichniy NVCh-kontrol vlastivostey materIalIv* [Aerophare SHF-control of properties of materials], IPShI “Nauka i osvita”, Donetsk, Ukraine.
7. Suslov, A.N., Pjatsi A. H. and Kalitjonkov N.V. (2009), “Prospects for the use on ships radioteplolokatorov in modern conditions of navigation”, *Vestnik MGTU: trudy Murm. gos. tehn. un-ta*, vol. 12, no 2, pp. 239-249.
8. Kutsenko, V.P. (2012), “*Periodychnye porivnjannja sygnaliv v NVCh-radiometrii*” [Periodic comparison of signals in the microwave radiometry], IPShI «Nauka i osvita», Donetsk, Ukraine.
9. Skripnik, Ju.A., Shevchenko K.L. and Kutsenko V.P. (2010), “Differential modulation radiometer”, *Materialy 20-j mezhdunarodnoj konferencii «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (KryMiKo – 2010)*, pp. 1005-1006.

Надійшла до редакції:
25.02.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. А.А. Зорі

В.П. Куценко

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

К.Л. Шевченко

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Повышение точности измерения разности мощностей излучений. Предложено для измерения разности мощностей слабых СВЧ-электромагнитных излучений на фоне интенсивных шумов использовать дифференциальные модуляционные радиометрические системы в бездетекторном варианте. Показано, что чувствительность бездетекторной схемы радиометрической системы улучшается в 3 – 4 раза по сравнению с детекторной схемой, и в 2 – 2,5 раза по сравнению с супергетеродинным преобразованием частоты СВЧ-сигналов. Уровень полезного шумового сигнала снизился с 10 – 30% от мощности внутренних шумов схемы дифференциальной модуляционной радиометрической системы до 0,05 – 0,10%.

Ключевые слова: измерение, СВЧ-электромагнитные излучения, дифференциальные модуляционные радиометрические системы, повышение точности, разница мощностей.

V.P. Kutsenko

Donetsk National Technical University

K.L. Shevchenko

Kiev National University of Technology and Design

Increasing the accuracy of measuring the difference in radiation power. *We propose to use differential modulation radiometric systems for measuring the difference between the capacities of weak microwave electromagnetic radiation on the background of intensive noise. In the differential system the ratio "signal - noise" at its input is much less than unity (0.005 - 0.5). Under such conditions, a quadratic detector severely limits its sensitivity. In this connection the task is a significant increase in sensitivity and resolution, which will improve the accuracy of measuring the difference in power of low-intensity electromagnetic radiations using the functional diagram of a differential system in the form without detector. The absence in the scheme of square-law detector eliminated the effect of suppressing the useful signal from the noise from compared electromagnetic radiation by interference in the form of intrinsic microwave noise of the receiver path and the frequency converter. The result is increased sensitivity to the difference of electromagnetic radiation, a decrease in sensitivity threshold and the accuracy of weak electromagnetic radiation measurement. The reduction of fluctuation sensitivity threshold is due to the exclusion from the scheme of differential modulation of a selective low-frequency amplifier and a synchronous detector. The fact is that with the narrow bandwidth selective CFP (which is necessary to suppress the low frequency noise) the fluctuations of voltage amplitude of modulated signal bypass increase due to the instability of low frequency oscillator frequency. Synchronous detector points out these fluctuations in the form of infra-low frequency voltage, which drastically reduces the fluctuation threshold of a differential system. Therefore, the exclusion from the scheme of both quadratic and simultaneous detector greatly increases the sensitivity of the circuit. Thus, the proposed scheme without detector has increased sensitivity and accuracy that allow detecting and measuring small gradients of electromagnetic radiation. Studies have shown that the sensitivity of the detectorless circuit is improved by 3 - 4 times as compared to the detector circuit, and by 2 - 2.5 times as compared with the superheterodyne frequency conversion of RF signals. Utility level of the noise signal has fallen from 10 - 30% of the capacity of the internal noise of the differential modulation scheme of the system to 0.05 - 0.10%. Output voltage is greater than 25 - 30 dB if compared to the detection circuit due to increasing by the differential amplifier of the difference in constant components of videopulses that are "clogged" with the products of intrinsic noise transformation with noise signals of receiving antennas.*

Keywords: measurement, microwave electromagnetic radiation, differential modulation radiometric system, improving the accuracy of difference capacities.



Куценко Владимир Петрович, Украина, окончил Таганрогский радиотехнический институт, Заслуженный работник промышленности Украины, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры автоматизации и телекоммуникаций Донецкого национального технического университета (пл. Шибанкова, 2 г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.



Шевченко Константин Леонидович, Украина, окончил Киевский технологический институт легкой промышленности, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Киевского национального университета технологий и дизайна (ул. Немировича-Данченко, 2, г. Киев, 01011, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.