



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-83-89>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375.029

БАЛАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ОВЧ С БЕСШУМНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

И.Ю. МАЛЕВИЧ¹., П.В. ЗАЯЦ²

¹ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ООО «Аналоговые системы» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 16 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Современная практика разработки радиотехнических трактов диапазона ОВЧ в качестве маломощных усилителей широко использует монолитные интегральные схемы (МИС). Такой подход оправдан для радиосистем, работающих в относительно спокойной электромагнитной обстановке. Однако для радиосредств, функционирующих в сложной помеховой обстановке диапазона ОВЧ, желательны устройства с небольшим коэффициентом передачи и увеличенной перегрузочной способностью. При этом требуется сохранение малого коэффициента шума и технологичности устройства. Актуальность решения этой задачи обуславливает разработку маломощного усилителя диапазона ОВЧ с повышенной перегрузочной способностью, выполненного на коммерчески доступных МИС. В настоящей работе представлены результаты логико-эвристического синтеза маломощного высоколинейного усилителя диапазона ОВЧ с балансной структурой, выполненной на МИС, охваченных бесшумными обратными связями. Приведены аналитические зависимости для расчета коэффициента усиления, входной точки децибельной компрессии, входной точки пересечения J -го порядка и коэффициента шума структуры. Проведенный анализ технических характеристик усилителя, реализованного на МИС MGA-62563, показал, что в сравнении с типовыми интегральными аналогами обеспечиваются повышенные перегрузочная способность и линейность структуры. Высокие помехозащищенность и технологичность устройства, выполненного на стандартных коммерчески доступных компонентах, позволяют рассматривать его в качестве перспективного элемента при проектировании и модернизации приемно-усилительных трактов диапазона ОВЧ, функционирующих в сложной электромагнитной обстановке.

Ключевые слова: балансный маломощный усилитель, ОВЧ, обратная связь без потерь.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Балансный усилитель ОВЧ с бесшумными обратными связями. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 83-89.

VHF BALANCED AMPLIFIER WITH LOSSLESS FEEDBACKS

IGOR Y. MALEVICH¹, PAVEL V. ZAYATS²

¹JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” (Republic of Belarus)

²LLC “Analog systems” (Republic of Belarus)

Submitted 16 December 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Today’s practice of developing VHF radio systems paths widely uses MMIC as low-noise amplifiers. This approach is acceptable for radio systems operating in a relatively quiet electromagnetic environment. However, for systems operating in a complex interference environment of the VHF band, low-noise amplifiers with a lower gain and increased overload capacity are desirable. This requires maintaining a low noise figure and manufacturability of the device. Therefore, the solution to this problem requires the development of a low-noise amplifier of the VHF band with increased overload capacity, made on commercially available MMIC. This paper presents the results of a logical-heuristic synthesis of a VHF low-noise high-linear amplifier performed on an MMIC, utilising noiseless negative feedback technique. Analytical expressions are given for calculating the gain, the input gain compression point, input intercept points of the J-th order, and the noise figure of the structure. The analysis of the performance of the amplifier implemented on the MGA 62563 MMIC showed that, in comparison with other integrated solutions, increased overload capacity and structure linearity are provided. The high noise immunity and ease of manufacture of the device using commercially available components, make it a promising element in the design and modernization of VHF receiving and amplifying paths operating in a complex electromagnetic environment.

Keywords: balanced low-noise amplifier, VHF, lossless feedback.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Malevich I.Y., Zayats P.V. VHF Balanced Amplifier with Lossless Feedbacks. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 83-89.

Введение

Современная практика разработки радиотехнических трактов диапазона ОВЧ в качестве маломощных усилителей (МШУ) обычно использует широкополосные СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС). Такие приборы имеют, как правило, 50-омные присоединительные импедансы, высокий коэффициент усиления ($K = 20...25$ дБ), низкий коэффициент шума ($NF = 0,5...2,0$ дБ), внушительную перегрузочную способность ($IP_{-1дБ} = 0...5$ дБм) и успешно применяются в радиосистемах, работающих в спокойной электромагнитной обстановке. Однако для радиосредств, функционирующих в сложной помеховой обстановке диапазона ОВЧ, желательны устройства с меньшим коэффициентом передачи ($G = 10...15$ дБ) и увеличенной на $5...10$ дБ перегрузочной способностью. При этом требуется сохранение малого коэффициента шума и технологичности устройства.

Актуальность решения этой задачи обуславливает разработку новых структур МШУ диапазона ОВЧ с повышенной перегрузочной способностью, выполненных на МИС.

Структурный синтез

Известным структурным методом, позволяющим выполнить масштабирование коэффициента усиления активного прибора с увеличением его перегрузочной способности, является использование контура отрицательной обратной связи (ООС) [1, 2].

Так, построение МШУ по схеме с трансформаторной (бесшумной) ООС (рис. 1) на активных элементах с достаточно большим коэффициентом усиления ($K > 18...24$ дБ)

обеспечивает определяющее влияние передаточного отношения обмоток m в трансформаторе T на результирующий коэффициент передачи устройства:

$$G \approx 20 \lg(m + 1). \quad (1)$$

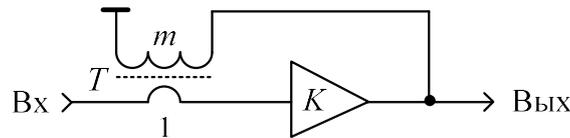


Рис. 1. Схема МШУ с ООС без потерь
Fig. 1. LNA circuit with lossless feedback

При этом коэффициент шума такого МШУ будет сопоставим с шумами активного прибора (NF_K):

$$NF \approx NF_K, \quad (2)$$

а перегрузочная способность устройства, оцениваемая $IP_{-1\text{дБ}}$ в сравнении с входной точкой компрессии K ($IP_{-1\text{дБ}K}$), увеличится на $(K-G)_{[\text{дБ}]}$:

$$IP_{-1\text{дБ}} \approx IP_{-1\text{дБ}K} + (K-G)_{[\text{дБ}]}. \quad (3)$$

Однако охват МИС достаточно глубокой ООС приводит к существенному изменению присоединительных импедансов устройства и, как следствие, ощутимому рассогласованию с волновым сопротивлением тракта.

Проблема может быть решена использованием балансной структуры с квадратурными каналами для построения МШУ (рис. 2).

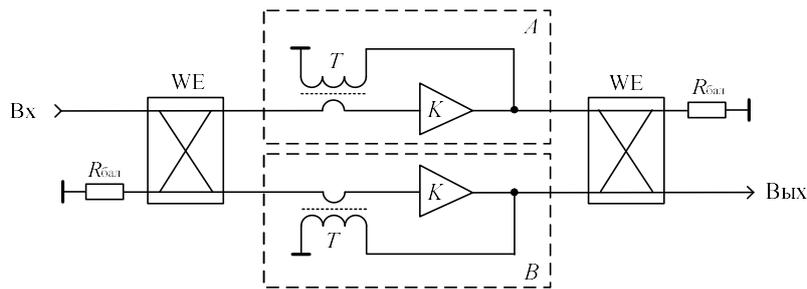


Рис. 2. Схема балансного МШУ ОБЧ с бесшумными обратными связями
Fig. 2. VHF balanced LNA circuit with lossless feedbacks

В такой структуре коэффициенты стоячей волны напряжения по входу ($KCBH_{\text{вх}}$) и выходу ($KCBH_{\text{вых}}$) определяются выражениями [3]:

$$KCBH_{\text{вх}} = (1 + |(2d^2 - 1)(S_{11A} + S_{11B})/2 + (S_{11A} - S_{11B})/2|) / (1 - |(2d^2 - 1)(S_{11A} + S_{11B})/2 + (S_{11A} - S_{11B})/2|), \quad (4)$$

$$KCBH_{\text{вых}} = (1 + |(2d^2 - 1)(S_{22A} + S_{22B})/2 + (S_{22A} - S_{22B})/2|) / (1 - |(2d^2 - 1)(S_{22A} + S_{22B})/2 + (S_{22A} - S_{22B})/2|), \quad (5)$$

где S_{11A} , S_{22A} – соответственно входной и выходной S -параметры усилительного модуля A ; S_{11B} , S_{22B} – соответственно входной и выходной S -параметры усилительного модуля B ; d – переходное ослабление квадратурных мостов WE .

Поскольку при построении усилительных модулей A и B предполагается использование достаточно глубоких трансформаторных ООС, присоединительные параметры квадратурных каналов структуры могут быть широкополосно реализованы с высокой степенью подобия: $S_{11A} \approx S_{11B}$; $S_{22A} \approx S_{22B}$. Учитывая также, что квадратурные мосты WE ОБЧ диапазона позволяют обеспечивать практически равноамплитудное деление и суммирование сигналов ($d \approx 0,707$), можно прогнозировать реализацию согласования по входу и выходу балансного МШУ с $KCBH \approx 1,2 \dots 1,5$.

Коэффициент усиления балансного МШУ с бесшумными обратными связями с учетом потерь в квадратурных мостах WE (L_{WE}) определится выражением

$$G \approx 20 \lg(m + 1) - 2L_{WE}, \quad (6)$$

коэффициент шума устройства – выражением

$$NF \approx L_{WE} + NF_K, \quad (7)$$

а входная точка децибельной компрессии соответственно выражением

$$IP_{-1\text{дБ}} \approx IP_{-1\text{дБК}} + L_{WE} + (K-G) + 3 \text{ дБ}. \quad (8)$$

Линейность передаточной характеристики устройства в терминах входной точки пересечения J -го порядка (IPJ) с учетом входной точки пересечения J -го порядка МИС (IPJ_K) выразится зависимостью

$$IPJ_G = IPJ_K + \frac{J}{(J-1)} \cdot (K-G) + \frac{J}{(J-1)} L_{WE} + 3 \text{ дБ}. \quad (9)$$

Видно, что разработанная структура позволяет масштабировать коэффициент усиления МИС с пропорциональным изменением перегрузочной способности, линейности и сохранением малого коэффициента шума.

Разработка технического решения

В структуре (рис. 2) входной радиосигнал разделяется квадратурным мостом WE на два канала и со сдвигом фаз на 90° подводится к усилительным ячейкам A и B , каждая из которых выполняется на МИС МШУ (K) с последовательной по входу общей трансформаторной ООС по напряжению. Применение серийных трансформаторов T гарантирует сходство параметров квадратурных каналов структуры. Появляющиеся в результате несогласованности входных импедансов усилительных ячеек отраженные волны поглощаются в балансной нагрузке ($R_{\text{бал}} = 50 \text{ Ом}$). Усиленные A и B ячейками радиосигналы суммируются выходным WE , а возникающие сигналы отражений поглощаются согласованной нагрузкой $R_{\text{бал}} = 50 \text{ Ом}$.

Диапазон рабочих частот структуры по верхнему пределу определяется максимальной частотой работы двухобмоточных трансформаторов T , а по нижнему – минимальной рабочей частотой квадратурных мостов WE . Известно [4–6], граничная частота работы трансформаторов с магнитной связью между обмотками может составлять $300 \dots 500 \text{ МГц}$, а широкополосные квадратурные мосты с малыми потерями реализуются, начиная с частот $70 \dots 100 \text{ МГц}$.

При выборе МИС (при прочих сопоставимых параметрах) предпочтение имеют усилительные приборы с одной усилительной ступенью и наибольшим K . Поэтому, принимая во внимание данные типовых МИС МШУ, используемых в диапазоне ОВЧ (рис. 3), в качестве активного прибора рационально выбрать MGA-62563.

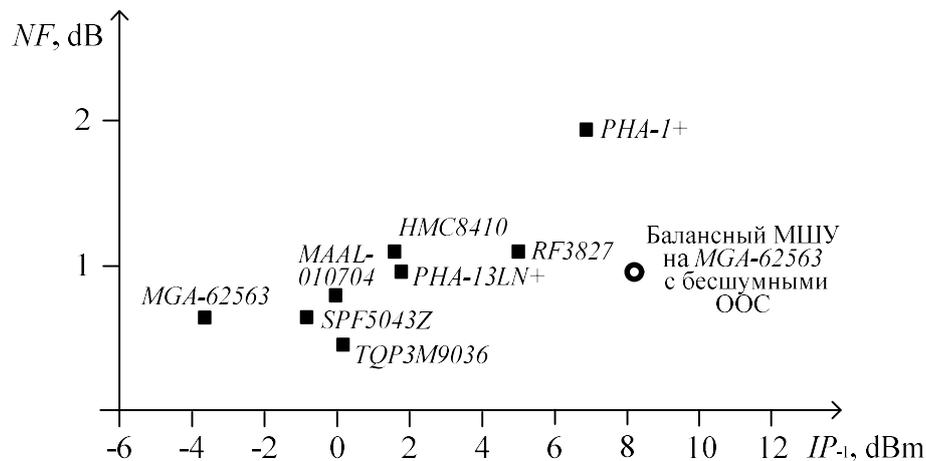


Рис. 3. Параметры динамического диапазона типовых МИС МШУ в диапазоне ОВЧ
Fig. 3. Parameters of the dynamic range of typical MMIC LNA in the VHF

Моделирование балансного МШУ

С целью проверки и оптимизации характеристик балансного усилителя с бесшумными ООС, выполненного на МИС MGA-62563, разработана модель устройства в среде ADS (рис. 4). Для описания элементов схемы (МИС MGA-62563, трансформаторов ООС $T1$ и $T2$ с $m = 4$ и квадратурных мостов $WE1$ и $WE2$) использованы модели стандартной библиотеки среды моделирования.

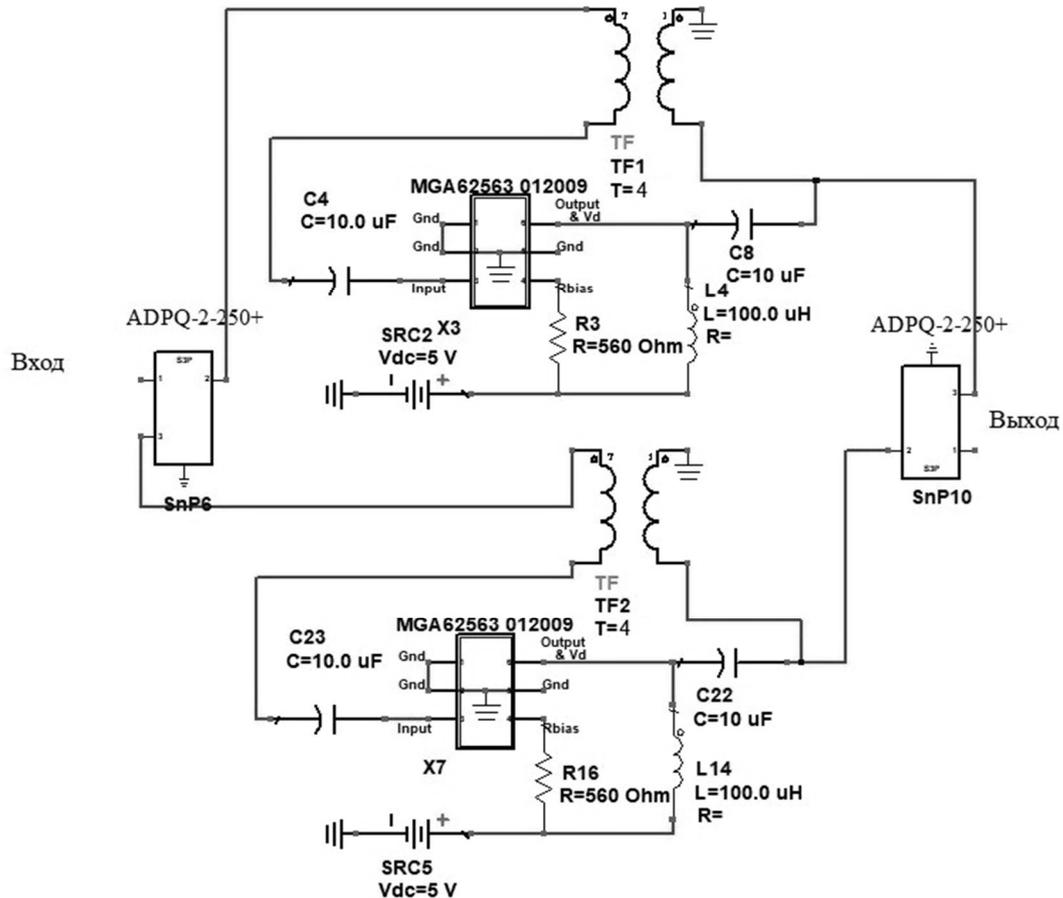


Рис. 4. Модель балансного МШУ с бесшумными ООС в среде ADS
Fig. 4. Model of balanced LNA with lossless feedbacks in ADS environment

На рис. 5 представлены частотные зависимости основных характеристик МИС MGA-62563 и балансной структуры на МИС MGA-62563.

Видно, что разработанный балансный усилитель с бесшумными обратными связями в 50-омном тракте в диапазоне 150...300 МГц обеспечивает коэффициент усиления 14 дБ с неравномерностью $\pm 0,2$ дБ, КСВН не более 1,4, входную точку компрессии 8,1..8,8 дБм при коэффициенте шума 0,92...1,25 дБ. Значение $IP3$ структуры с ростом частоты монотонно снижается с 26,5 до 24,5 дБм.

Анализ полученных характеристик показывает, что результаты моделирования хорошо согласуются с аналитическими выражениями, описывающими работу структуры. Параметры динамического диапазона разработанного усилителя для сравнения с типовыми интегральными аналогами отображены на рис. 3.

В целом динамический диапазон разработанной структуры на MGA-62563 в пересчете к полосе 1 МГц составляет порядка 121 дБ, что на 11..12 дБ выше, чем у одиночной МИС.

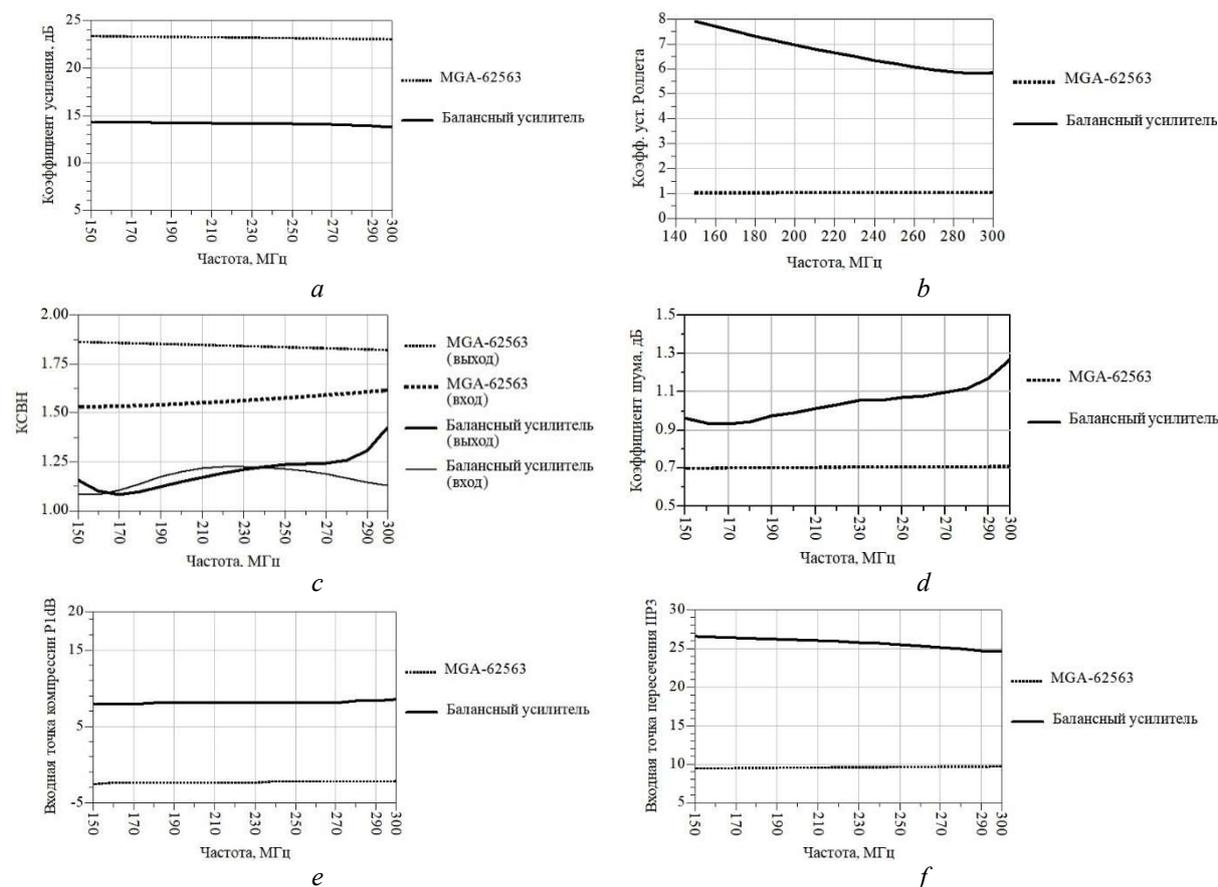


Рис. 5. Зависимости от частоты коэффициентов усиления (а), коэффициентов устойчивости Роллета (b), КСВН (с), коэффициентов шума (d), входной точки децибельной компрессии (e) и входной точки пересечения 3-го порядка (f) МИС MGA-62563 и балансной структуры
Fig. 5. Frequency dependences of the gain (a), Rollet stability coefficient (b), VSWR (c), noise figure (d), input compression point (e) and input 3-order intercept point (f) of MMIC MGA-62563 and balanced structure

Заключение

Представлены результаты логико-эвристического синтеза малошумящего высоколинейного усилителя диапазона ОВЧ с балансной структурой, выполненной на МИС, охваченных бесшумными обратными связями.

Приведены аналитические зависимости для расчета коэффициента усиления, входной точки децибельной компрессии, входной точки пересечения J -го порядка и коэффициента шума структуры. Проведенный анализ технических характеристик усилителя, реализованного на МИС MGA-62563, показал, что в сравнении с типовыми интегральными аналогами обеспечиваются повышенные перегрузочная способность и линейность структуры.

Высокие помехозащищенность и технологичность устройства, выполненного на стандартных коммерчески доступных компонентах, позволяют рассматривать его в качестве перспективного элемента при проектировании и модернизации приемно-усилительных трактов диапазона ОВЧ, функционирующих в сложной электромагнитной обстановке.

Список литературы

1. Малевич И.Ю. *Методы синтеза широкополосных усилительных трактов с контролируемыми параметрами динамического диапазона*. Минск: Тонпик; 2004.
2. Малевич И.Ю. *Синтез высоколинейных радиочастотных усилительных трактов*. Минск: Бестпринт; 2009.
3. Петров Г.В., Толстой А.И. *Линейные балансные СВЧ усилители*. Москва: Радио и связь; 1983.

4. Carr J. *RF Components and Circuits*. Woburn: Newnes; 2002.
5. Maloratsky L.G. *Passive RF and Microwave Integrated Circuits*. Burlington: Newnew; 2004.
6. Belov L.A., Smolskiy S.M., Kochemasov V.N. *Handbook of RF, Microwave, and Millimeter-Wave Components*. Boston/London: Artech House; 2012.

References

1. Malevich I. Y. [*Methods for the synthesis of broadband amplifying paths with controlled parameters of the dynamic range*]. Minsk: Tonpik; 2004. (In Russ.)
2. Malevich I.Y. [*Synthesis of High-Linear RF Amplifier Paths*]. Minsk: Bestprint; 2009. (In Russ.)
3. Petrov G.V., Tolstoy A.I. [*Linear balanced microwave amplifiers*]. Moscow: Radio and Sviaz; 1983.
4. Carr J. *RF Components and Circuits*. Woburn: Newnes; 2002.
5. Maloratsky L.G. *Passive RF and Microwave Integrated Circuits*. Burlington: Newnew; 2004.
6. Belov L.A., Smolskiy S.M., Kochemasov V.N. *Handbook of RF, Microwave, and Millimeter-Wave Components*. Boston/London: Artech House; 2012.

Сведения об авторах

Малевич И.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Заяц П.В., директор ООО «Аналоговые системы».

Information about the authors

Malevich I.Y., Dr. of Sci., Professor, Principal Research Scientist of JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Zayats P.V., Director of LLC “Analog systems”.

Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,
г. Минск, Партизанский пр-т, 64 а,
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»;
тел. +375-17-390-30-91;
e-mail: i.malevich@kbradar.by
Малевич Игорь Юрьевич

Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,
Minsk, Partizanski Ave., 64 a,
JSC “KB Radar” – Managing Company
of “Radar Systems” Holding;
tel. +375-17-390-30-91;
e-mail: i.malevich@kbradar.by
Malevich Igor Yur'evich