



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.396

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-4>

Фазовый преселектор, подавляющий зеркальный канал в радиоприёмнике



Анатолий ВОЛКОВ



Максим МОРОЗОВ

Анатолий Алексеевич Волков¹,
Максим Сергеевич Морозов²

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия.

² АО «Метротранс», Москва, Россия.

✉ ² raconteurs.mm@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

До сих пор в радиоприёмнике для подавления зеркального канала используется частотный преселектор, состоящий из колебательных контуров входного устройства и усилителя радиочастоты. Но он недостаточно сильно подавляет зеркальный канал. Поэтому в системах железнодорожной радиосвязи часто используют два преобразования частот. Например, для станционной радиосвязи на частотах $f = 151\text{--}156\text{ МГц}$ используют $f_{\text{пр1}} = 24\text{ МГц}$ и $f_{\text{пр2}} = 1,596\text{ МГц}$, что значительно усложняет приёмник.

В данной статье предлагается использовать фазовый преселектор, который является вторым параллельным квадратурным преобразователем частоты, сигнал которого, пройдя дополнительные элементы, суммируется с сигналом первого преобразователя частоты с высоким подавлением зеркального канала. При таком способе организации

связи полосовой фазовращатель будет проблемным блоком в фазовом преселекторе, поскольку он должен иметь малую погрешность $\Delta\varphi$.

Представлен полосовой фазовращатель, выполненный на RC-цепочках с минимальной погрешностью фазового сдвига $\Delta\varphi = 0,1^\circ$ в полосе частот 25 кГц. В случае увеличения полосы частот погрешность фазового сдвига остаётся минимальной, однако необходимо использовать усилители-ограничители для выравнивания амплитуд сигналов на его выходе.

Использование фазового преселектора вместо частотного поможет снизить промежуточную частоту, что приведёт к высокой избирательности как по соседнему, так и по зеркальному каналам с однопольной модуляцией, а также упростит и удешевит приёмник сигналов.

Ключевые слова: транспорт, связь, фазовый и частотный преселекторы, избирательность по зеркальному и соседнему каналам, полосовой фазовращатель на 90° , фазоинвертор, RC-цепочки, перемножители сигналов, усилители-ограничители по амплитуде.

Для цитирования: Волков А. А., Морозов М. С. Фазовый преселектор, подавляющий зеркальный канал в радиоприёмнике // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 1 (98). С. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Радиосвязь играет большую роль для обеспечения бесперебойности и безопасности перевозок на всех видах транспорта, в том числе на железнодорожном.

Важнейшей проблемой является обеспечение надёжности связи, передачи сигнала без существенных искажений. При этом до сих пор в радиоприёмнике для подавления зеркального канала используется частотный преселектор, состоящий из колебательных контуров входного устройства и усилителя радиочастоты, который недостаточно сильно подавляет зеркальный канал. Поэтому в системах железнодорожной радиосвязи часто используют два преобразования частот.

В данной статье предлагается использовать фазовый преселектор, который является вторым параллельным квадратурным преобразователем частоты, сигнал которого, пройдя дополнительные элементы, суммируется с сигналом первого преобразователя частоты с высоким подавлением зеркального канала.

Фазовый преселектор подавляет зеркальный канал в радиоприёмнике эффективнее, чем известный частотный преселектор, и в приёмнике они используются вместе [1–4]. Это позволяет иметь высокую избирательность по зеркальному каналу и выбирать только одну низкую промежуточную частоту $f_{пр} = 465 \text{ кГц}$, при которой высока избирательность и по соседнему каналу. Принцип работы фазового преселектора базируется на двукратной однополосной модуляции (ОБП АМ), когда каждая из двух боковых полос амплитудно-модулированного (АМ) колебания без несущей несут разную информацию,

т.е. двух каналов. В радиоприёмнике эти каналы разделяются по схеме, предложенной советским учёным Е. Г. Момотом [5]. Изобретения автора по данной тематике изложены в его монографии «Проектирование и техника синхронного радиоприёма», первоначально изданной в Ленинграде в 1941 году. Но в 1941 году началась Великая Отечественная война и при вражеском авианалёте на блокадный Ленинград сгорела типография, в которой находился весь тираж монографии Евгения Момота. И только после Великой Отечественной войны случайно удалось найти сигнальный экземпляр этой монографии и второй раз издать её в 1961 году, т.е. ровно через 20 лет. Эта предыстория появления второго издания изложена в предисловии к нему, написанному известным учёным, член-корреспондентом АН СССР В. И. Сифоровым [5].

Целью статьи является обоснование использования и технического решения полосового фазовращателя, выполненного на RC-цепочках с минимальной погрешностью фазового сдвига $\Delta\varphi = 0,1^\circ$ в полосе частот 25 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Двукратная однополосная амплитудная модуляция с одной боковой полосой

Поскольку сигналы двух каналов передаются одновременно на двух боковых полосах одного амплитудно-модулированного колебания (АМ) без несущей, то их надо разделить при когерентном детектировании в радиоприёмнике.

Схема такого разделения [5] двух каналов представлена на рис. 1. Когерентный детектор обведен пунктирной линией [5].

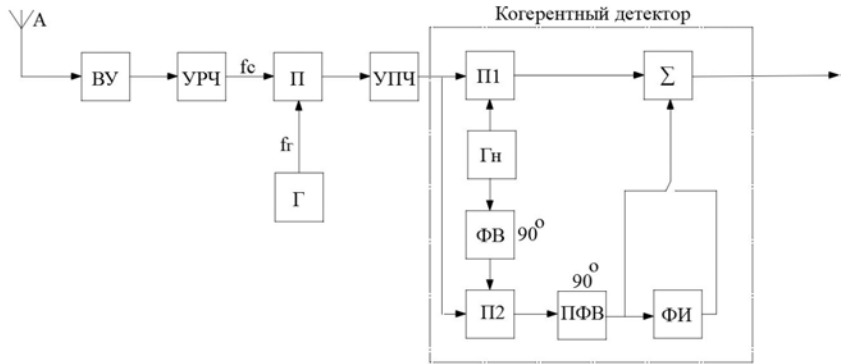


Рис. 1. Схема разделения каналов в когерентном детекторе [5].

На данном и последующих рисунках приняты следующие краткие обозначения: А – антенна, ВУ – входное устройство, П – перемножитель, Г – гетеродин, УРЧ – усилитель радиочастоты, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, f_c – частота информационного сигнала, f_g – частота гетеродина, $f_{пр}$ – промежуточная частота, f_z – частота зеркального канала, Гн – генератор несущей, ФВ – фазовращатель, ПФВ – полосовой фазовращатель, ФИ – фазоинвертор, Σ – сумматор, ФСС – фильтр сосредоточенной селекции, Д – динамик, ОА – ограничители амплитуды, ЧД – частотный детектор, УЗЧ – усилитель звуковой частоты.



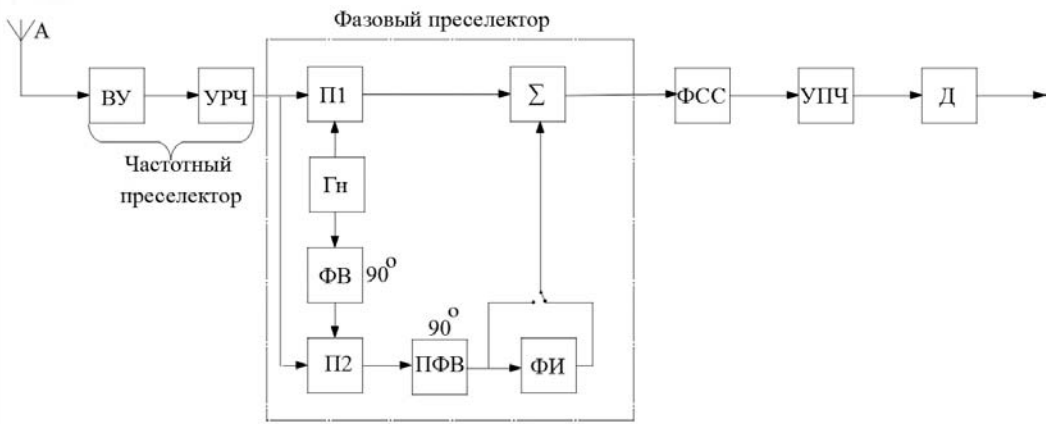


Рис. 2а. Структурная схема радиоприёмника с фазовым преселектором [выполнено авторами].

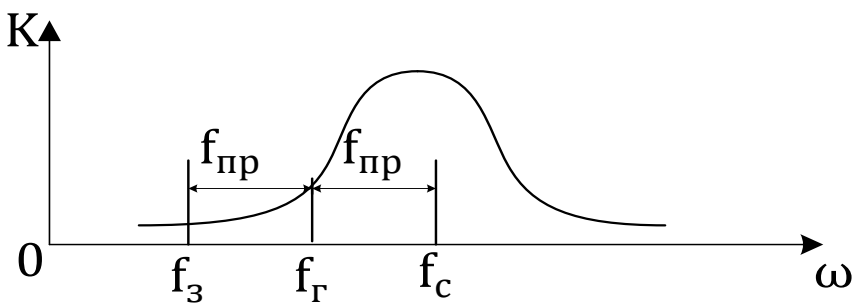


Рис. 2б. Работа частотного преселектора [выполнено авторами].

Работа схемы когерентного детектора происходит следующим образом. Входное напряжение с преобразователя частоты после усиления в УПЧ поступает на первые входы П1 и П2 когерентного детектора:

$$u_p(t) = U_m \sin(\omega - \Omega_1)t + U_m \sin(\omega + \Omega_2)t.$$

На второй вход П1 подаётся «несущая» частота с блока Гн $u_r(t) = U \sin \omega t$ [6] непосредственно, а на второй вход второго множителя подаётся это же напряжение через фазовращатель [7].

На выходе блоков «П1» и «П2» получают сигналы [8]:

$$\begin{aligned} u_{n1}(t) &= u_{np}(t) u_r(t) = \\ &= 0,5 U_z U_m \cos(\Omega_1 t) + 0,5 U_z U_m \cos(\Omega_2 t) + BЧ; \\ u_{n2}(t) &= u_{np}(t) \hat{u}_r(t) = 0,5 U_z U_m \cos(\Omega_1 t + 90^\circ) + \\ &+ 0,5 U_z U_m \cos(\Omega_2 t - 90^\circ) + BЧ = \\ &= -0,5 U_z U_m \sin(\Omega_1 t) + 0,5 U_z U_m \sin(\Omega_2 t) + BЧ. \end{aligned}$$

Таким образом, сигналы обоих каналов разделяются, для чего необходимы два сумматора Σ : на сумматор Σ_1 подаётся с входа ФИ, а на Σ_2 – с выхода ФИ.

2. Фазовый преселектор

Фазовый преселектор, как и частотный преселектор, подавляет зеркальный канал в радиоприёмнике. Зеркальный канал отстоит от частоты гетеродина в преобразователе частоты на промежуточную частоту $f_{пр}$, но по другую сторону от частоты основного сигнала, как две боковые полосы АМ колебания отстоят от его несущей частоты. Поэтому «зеркальный канал» при преобразовании частоты должен занять одну и ту же полосу частот [10–18], что и основной канал. От этого радиосвязь нарушается. Однако зеркальный канал можно подавить по схеме «квадратной ОБП АМ», поскольку в ней ко-

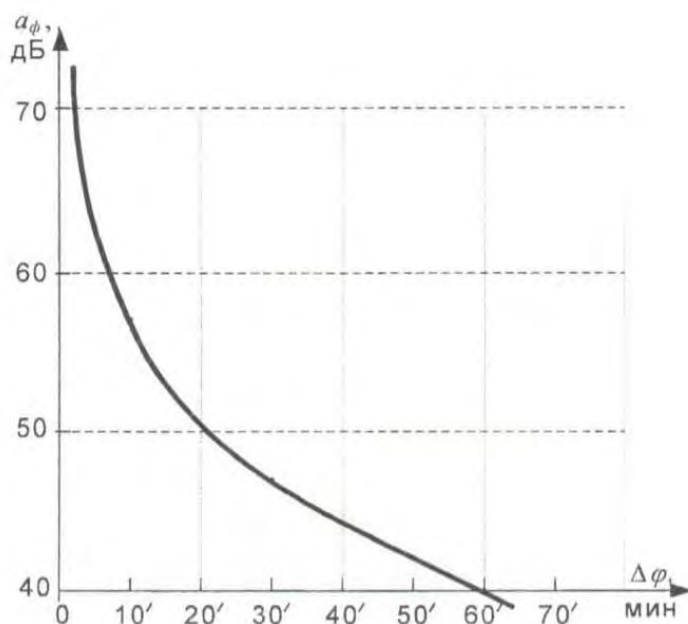


Рис. 3. Расчётные значения степени подавления зеркального канала [выполнено авторами].

герентный детектор состоит из перемножителя частот с фильтром низких частот на его выходе [19], а преобразователь частоты состоит тоже из перемножителя сигналов с полосовым фильтром промежуточной частоты. Для подавления зеркального канала в стандартном приёмнике следует подключить параллельно к основному преобразователю частоты второй такой же преобразователь ПР2 и все остальные блоки «квадратной ОБП АМ».

На рис. 2а представлена структурная схема радиоприёмника с фазовым преселектором, где сигнал с антенны А поступает на частотный преселектор. На рис. 2б представлена графически его работа [7]. Выход УРЧ подключён к первым входам перемножителей П1 и П2 обоих преобразователей частоты ПЧ. Ко второму входу П1 подключён гетеродин Г непосредственно, а ко второму входу П2 подключён этот же гетеродин Г, но через фазовращатель ФВ на 90° . Частота гетеродина ω_r может быть больше частоты основного сигнала ω_c , но меньше частоты зеркального канала: $\omega_z > \omega_r > \omega_c$, или наоборот.

Выход П1 подключён непосредственно к первому входу сумматора Σ , ко второму входу которого подключён выход П2 через последовательно включённые полосовой фазовращатель (ПФВ) на 90° и фазоинвертор ФИ,

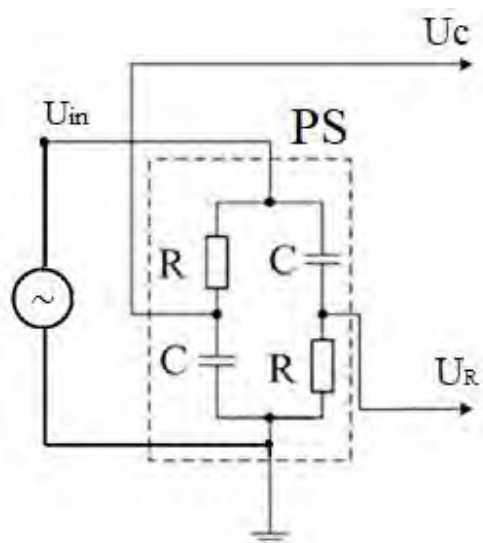


Рис. 4а. Схема ПФВ на 90° на RC-цепочках [выполнено авторами]: PS – полосовой фазовращатель, RC – RC-цепочки, U_{in} – входное напряжение, R – резистор, C – конденсатор, U_c и U_r – напряжения на выходах полосового фазовращателя.

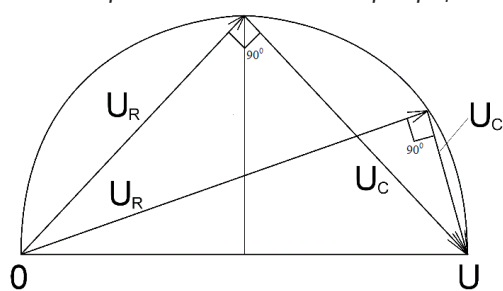


Рис. 4б. Векторная диаграмма ПФВ [выполнено авторами].

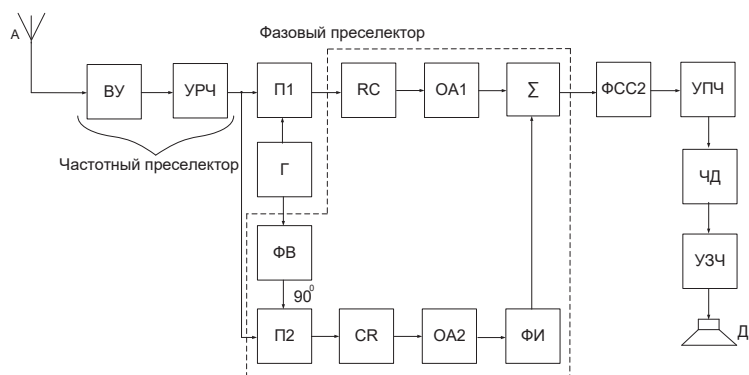


Рис. 5. Структурная схема приёмника с модернизированным ПФВ [выполнено авторами].

сдвигающий фазу входного сигнала на 180° . Выход сумматора подключён к динамике через последовательно включённые фильтр сосредоточенной селекции (ФСС) и усилитель промежуточной частоты (УПЧ). Видно, что когерентный детектор «квадратной ОБП АМ» переключён в преобразователь частоты приёмника согласно рис. 2а.

Высокочастотные (ВЧ) составляющие отфильтровываются в ФСС, осуществляющем избирательность по соседнему каналу. Зеркальный канал подавлен в результате фазовой компенсации согласно формуле подавления ОБП в когерентном детекторе «квадратурный ОБП АМ» [20].

$$a_\phi = 20 \lg \left| \frac{1 + \alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 2\alpha \cos \Delta\phi + 1}} \right|, \text{ дБ},$$

где α – отношение амплитуд обычных ОБП АМ, а $\Delta\phi$ – фазовая погрешность, точнее разность фаз ОБП АМ.

Если $a = \frac{a_2}{a_1} = 1$, то a_ϕ преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} a_\phi &= 20 \lg \left| \frac{2}{2(1 - \cos \Delta\phi)} \right| = \\ &= 20 \lg \left| \frac{2}{\sqrt{2^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)}} \right| = 20 \lg \left| \frac{1}{\sin(0,5\Delta\phi)} \right|, \text{ дБ}. \end{aligned}$$

На рис. 3 показана зависимость, построенная по формуле, представленной выше, из которой следует, что при $\Delta\phi = 2'$ значение $a_\phi = 80$ дБ. Однако в [21, с. 48], сказано, что реальные ПФВ на 90° обеспечивают $\Delta\phi = (2 - 3)^\circ$, чему соответствует $a_\phi = 30$ дБ, что недостаточно.

Для увеличения a_ϕ , необходимо совершенствовать ПФВ на 90° .

3. Модернизация ПФВ на 90°

Целесообразное увеличение a_ϕ возможно при выполнении ПФВ на 90° на RC-цепочках [9], согласно рис. 4а. Их работа представлена графически на рис. 4б при изменении частот.

Эксперимент показал, что фазовый сдвиг между U_R и U_C на 90° сохраняется в полосе частот 25 кГц с погрешностью $\Delta\phi = 0,1^\circ$, поскольку сопротивление ёмкости $X_C = \frac{1}{j\omega C}$,

а умножение на знак j означает сдвиг фазы на 90° , согласно [10, с. 46]. Однако амплитуды сигналов U_R и U_C сильно разнятся между собой в полосе частот более 25 кГц, поэтому для их выравнивания необходимо использовать усилители-ограничители.

Структурная схема приёмника с RC-цепочками и усилителями-ограничителями [9] представлена на рис. 5.

Работа схемы на рис. 5 не требует пояснений, поскольку она подробно рассмотрена на рис. 2 и рис. 4.

ВЫВОДЫ

1. Предложено использовать при преобразовании частоты в приёмнике для подавления зеркального канала принцип когерентного детектирования сигналов двух каналов, представленных одновременно на двух боковых полосах одного амплитудно-модулированного (АМ) колебания без несущей частоты.

2. Разработан [24; 25] простейший и точный фазовращатель на двух RC-цепочках, включённых параллельно и в обратном порядке [9; 11] с усилителями-ограничителями амплитуды сигналов, обеспечивающими подавление зеркального канала значи-

тельно больше, чем известный частотный преселектор.

3. Разработанный фазовый преселектор обеспечивает не только высокую избирательность по зеркальному каналу, но и позволяет иметь одну низкую промежуточную частоту, при которой высока избирательность и по соседнему каналу.

4. Уточнена формула подавления зеркального канала $a_{\phi} = 20 \lg \left| \frac{1}{\sin(0,5\Delta\phi)} \right|$, [дБ].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kawamura, Takashi; Shimotahira, Hiroshi; Otani, Akihito. Novel Tunable Filter for Millimeter-Wave Spectrum Analyzer Over 100 GHz. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, Vol. 63, Iss. 5, pp. 1320–1327. ISSN 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2014.2298258.
2. Kawamura, Takashi; Mattori, Shigenori. Proposal of over 100 GHz band waveguide switch. Wiley online library. Electrical Engineering in Japan, 2019. DOI: 10.1002/eej.23136. (Translated from IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials (Denki Gakkai Ronbunshi A), Vol. 138, No. 5, pp. 210–216. DOI: 10.1541/ieejfms.138.210).
3. Kawamura, Takashi; Mattori, Shigenori; Fuse, Mas-saaki. Evaluation of 140 GHz band filter bank prototype. Asia-Pacific Microwave Conference, 2018, pp. 13–15. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617411.
4. Kawamura, Takashi; Shimotahira, Hiroshi; Otani, Akihito. Novel Tunable Filter for Millimeter-Wave Spectrum Analyzer Over 100 GHz. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013, pp. 641–646. DOI: 10.1109/I2MTC.2013.6555494.
5. Момот Е. Г. Проблемы и техника синхронного радиоприёма. – М.: Госиздат, 1961. – 172 с. [Электронный ресурс]: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/M/MOMOT_Evgeniy_Grigor'evich/_Momot_E.G..html. Доступ 17.01.2022.
6. Патент РФ на изобретение № 2363091. Формирователь однополосного сигнала фазовым способом. А. А. Волков, И. А. Волкова. Приоритет от 29.02.2018 г. Оpubл. 27.07.2019 г. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37553560>. Доступ 17.01.2022.
7. Волков А. А., Морозов М. С. Способ повышения избирательности сигналов в радиосвязи // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 56–63. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/910>. Доступ 17.01.2022.
8. Волков А. А., Кузюков В. А., Морозов М. С. Варианты модела для цифровой системы радиосвязи // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – № 6. – С. 48–56. [Электронный ресурс]: https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1367?locale=en_US. Доступ 17.01.2022.
9. Волков А. А., Морозов М. С. Максимизация избирательности сигналов в радиоприёмнике // Электросвязь. – 2019. – № 11. – С. 48–50.
10. Зюко А. Г., Коробов Ю. Ф. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1972. – 360 с.
11. Верзунов М. В., Лобанов И. В., Семёнов А. М. Однополосная модуляция. – М.: Госиздат литературы по вопросам связи и радио, 1962. – 300 с.

12. Волков А. А. Радиопередающие устройства. – М.: Маршрут, 2002. – 352 с. ISBN 5-89035-079-X. [Электронный ресурс]: <https://ru.djvu.online/file/acizm8CNMOoDx>. Доступ 17.01.2022.

13. Горелов Г. В., Волков А. А., Шелухин В. И. Каналообразующие устройства железнодорожной телемеханики и связи. – М.: ГОИ, 2007. – 403 с. ISBN 978-5-89035-420-4. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/gorelov-g-v-volkov-a-a-sheluhin-s-v-kanalooobrazuyuschie-ustroystva-zheleznodorozhnoy-telemechaniki-i-svyazi_61330895804.html. Доступ 17.01.2022.

14. Rappaport, Th. S. Wireless Communications (Principles and Practice). New York, IEEE Press, 1996, 641 p. ISBN 0-13-042232-0.

15. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского – М.: Радио и связь, 2000. – 797 с.

16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Изд. дом Вильямс, 2007. – 1099 с. ISBN 978-5-8459-0497-3. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/sklyar-b-cifrovaya-svyaz-teoreticheskie-osnovy-i-prakticheskoe-primenenie_5fb0497bb4c.html. Доступ 17.01.2022.

17. Верзунов М. В. Однополосная модуляция в радиосвязи. – М.: Воениздат, 1972 – 296 с. [Электронный ресурс]: <http://www.radiosovet.ru/book/radiotv/6254-odnopolosnaya-modulyaciya-v-radiosvyazi.html>. Доступ 17.01.2022.

18. Фомин А. Ф., Ваванов Ю. В. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи. – М.: Транспорт, 1987. – 295 с. [Электронный ресурс]: <http://biblus.ru/Default.aspx?book=4q2i27e1e6>. Доступ 17.01.2022.

19. Волков А. А., Кузюков В. А., Морозов М. С. Максимизация помехоустойчивости приёма цифровых сигналов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – Вып. 4. – С. 146–150. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-146-150.

20. Волков А. А., Кузюков В. А. Повышение качества клипированных речевых сигналов // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 5. – С. 38–43. [Электронный ресурс]: https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/446?locale=en_US. Доступ 17.01.2022.

21. Клягин Л. Е. Широкополосные фазовращатели. – М.: Связь, 1971. – 70 с.

22. Патент РФ на изобретение № 2745852. Формирователь цифрового сигнала однополосного колебания с ФМн на 180°. А. А. Волков, М. С. Морозов, В. А. Кузюков, И. А. Волкова. Приоритет от 23.10.2020 г. Оpubл. 02.04.2021 г. в БИ № 10. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_45809298_94753701.PDF. Доступ 17.01.2022.

23. Патент РФ на ПМ № 115986. Когерентный детектор сигналов с абсолютной фазовой манипуляцией на 180°. А. А. Волков. Оpubл. 10.05.2012 г. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38402932>. Доступ 17.01.2022.

24. Патент РФ на изобретение № 2259578. Фазокомпенсационный подавитель зеркального канала в приёмнике радиосигналов. А. А. Волков. Приоритет от 01.08.2014 г. Оpubл. 01.08.2014 г. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU2569578C1/ru>. Доступ 17.01.2022.

25. Патент РФ на ПМ № 150830. Формирователь цифрового сигнала однополосного колебания с ФМн на 180°. А. А. Волков, М. С. Морозов. Приоритет от 16.05.2014 г. Оpubл. 27.02.2015 г. в БИ № 6. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU125790U1/ru>. Доступ 17.01.2022. ●

Информация об авторах:

Волков Анатолий Алексеевич – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, aavolkov2009@rambler.ru.

Морозов Максим Сергеевич – инженер отдела автоматики, телемеханики и связи АО «Метрогипротранс», Москва, Россия, raconteurs.mm@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 17.01.2022, одобрена после рецензирования 18.02.2022, принята к публикации 28.02.2022.

