

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

FTAMP 27.25.19

<https://doi.org/10.48081/BGQF2150>

**Ә. М. Сәбиболда¹, А. К. Тулешов², А. Б. Сағындық³,
Ж. М. Досбаев⁴, *Н. Қ. Смайлов⁵**

^{1,2,4,5}Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

^{1,4,5}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1673-4036>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

*e-mail: n.smailov@satbayev.university

КЕҢЖОЛАҚТЫ СИГНАЛДАРҒА АРНАЛҒАН СПЕКТРАЛДЫ КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ- ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯЛЫҚ РАДИОПЕЛЕНГАТОРДЫҢ КЕДЕРГІГЕ ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада кеңейтілген спектрлі радиосәуленулерді қосарланған корреляциялық өңдеу арқылы жүзеге асыратын іздеусіз спектралды корреляциялық-интерферометриялық радиопеленгатордың (СКИР) күрделі электромагниттік жағдайдағы (ЭМЖ) кедергіге төзімділігі зерттеледі. Пеленгациялау процесінде қабылданатын аддитивті қоспалардың статистикалық модельдері қарастырылып, пайдалы сигнал мен әртүрлі типті кедергілердің (таржолоқты, кеңжолоқты және теңжолоқты) спектралды өзара орналасу ерекшеліктері ескерілді. Теориялық талдау нәтижесінде пеленгация қателігінің дисперсиясы сигнал/шу және сигнал/кедергі қатынастарына, талдау уақытына, сондай-ақ пайдалы сигнал спектрінің еніне тәуелді екені анықталды. Ерекше назар пайдалы сигнал мен кедергі спектрлері толық немесе ішінара қабаттасқан жағдайда пайда болатын «кеңістіктік блоктау» құбылысына аударылды, бұл пеленгация дәлдігінің аномальды нашарлауына әкеледі. Зерттеуде екі пеленгациялық арнасы бар радиопеленгатордың математикалық моделі қолданылып, электромагниттік ортаның

негізгі нұсқалары үшін қателік дисперсиясының шуылдық және кедергілік құраушылары талданды. MathCad ортасында әзірленген бағдарламалық модель негізінде жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері алынған теориялық тәуелділіктердің дұрыстығын растады және кедергінің спектралдық сипаттамалары пеленгация дәлдігіне шешуші әсер ететінін көрсетті. Алынған нәтижелер радиомониторинг және радионавигация жүйелерін күрделі ЭМЖ жағдайында қолдану тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу іздеусіз спектралды корреляциялық-интерферометриялық пеленгация әдістерін жетілдіру және кеңжосақты сигналдардағы олардың дәлдігін бағалау бағытындағы болашақ жұмыстардың өзектілігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: радиопеленгация, спектралды корреляция, корреляциялық алгоритм, электромагниттік кедергі, кеңжосақты сигнал, кеңістіктік блоктау.

Кіріспе

Радиомониторинг пен радионавигация жүйелерінің тиімділігі көп жағдайда олардың күрделі электромагниттік ортада жұмыс істеу қабілетіне тәуелді [1, 320–322-бб.]. Мұндай ортада пайдалы сигналдың параметрлері алдын ала белгісіз болуы, сыртқы кедергілердің әртүрлі спектралдық сипатта кездесу ықтималдығы және нақты уақыттағы өңдеуге қойылатын талаптар дәстүрлі радиопеленгациялық әдістердің шектеулерін айқын көрсетеді [2, 327–331-бб.]. Әсіресе кеңжосақты, шуға ұқсас сигналдарды пеленгациялау кезінде дәлдіктің төмендеуі мен кедергіге сезімталдықтың артуы жүйенің сенімділігін әлсіретеді [3, 3136–3140-бб.].

Осы мәселені шешудің перспективті жолдарының бірі – іздеуді қажет етпейтін, спектралдық және корреляциялық-интерферометриялық талдау қағидаларына негізделген әдістерді қолдану болып табылады [4, 3–6-бб.]. Мұндай тәсілдер сигналдың уақыттық кідірісі мен бағытын тікелей спектралды өңдеу нәтижесінде бағалауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде пеленгация жүйелерінің жедел әрекет етуін қамтамасыз етеді [5, 1–4-бб.]. Сонымен қатар, қосарланған корреляциялық өңдеуді пайдалану пайдалы ақпаратты бөліп алуды жеңілдетіп, кең ауқымды сигналдарға бейімделуге жағдай жасайды.

Дегенмен, сыртқы аддитивті кедергілердің әсері мұндай әдістердің артықшылықтарын айтарлықтай шектейді. Кедергілер спектрінің пайдалы сигнал спектрімен ішінара немесе толық қабаттасуы нәтижесінде «кеңістіктік блоктау» құбылысы туындайды. Бұл құбылыс пеленгация

категоріінің күрт артуына алып келіп, жүйенің функционалды тұрақтылығын төмендетеді [6, 182–186–66].

Осыған байланысты, мақалада іздеусіз спектралды корреляциялық-интерферометриялық радиопеленгатордың кедергіге төзімділігін зерттеу басты назарға алынады. Зерттеу барысында әртүрлі электромагниттік орта жағдайлары қарастырылып, қателік дисперсиясының өзгеру заңдылықтары талданады, сандық модельдеу нәтижелері ұсынылады және «кеңістіктік блоктау» құбылысының ерекшеліктері анықталады. Алынған нәтижелер практикалық тұрғыдан радиомониторинг және радионавигация жүйелерінің кедергіге төзімділігін арттыруға негіз бола алады.

Материалдар мен әдістері

Екі пеленгациялық радиоарнаны қолданатын, радиосәулеленуді қос корреляциялық өңдеуі бар іздеусіз спектрлік корреляциялық-интерферометриялық радиопеленгатордың кедергіге орнықтылығын зерттеуді орындайық.

Антенналары кеңістікте d антенналық база қашықтығына алшақтатылған және сәйкесінше $n_1(t)$ және $n_2(t)$ тәуелсіз аддитивті меншікті шулары бар радиопеленгатордың бір жұп бірдей пеленгациялық арналарымен бір уақытта пеленгтелетін пайдалы кездейсоқ кең жолақты $S_m(t)$ сигналы мен $S_z(t)$ кедергісі сәулеленулерінің $U(t)$ аддитивті қоспасын қабылдау жүзеге асырылсын [7, 3148–3152–66].

Бірінші арнамен талдау процесінің $t \in [0, T_a]$ соңғы уақыт аралығында $S_{1z}(t)$ кедергісінің және $n_1(t)$ ақ гаусстық шуының статистикалық тәуелсіз реализацияларымен $U_1(t)$ аддитивті қоспасында қабылданған $S_m(t)$ пайдалы сигналының реализациясы $S_{1m}(t)$ болсын, ал екінші арнамен радиопеленгатордың талдау процесінің $t \in [0, T_a]$ соңғы уақыт аралығында $S_{2z}(t)$ кедергісінің және $n_2(t)$ ақ гаусстық шуының статистикалық тәуелсіз реализацияларымен $U_2(t)$ аддитивті қоспасында қабылданған $S_m(t)$ пайдалы сигналының реализациясы $S_{2m}(t)$ болсын.

$U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспарын қабылдау бірінші және екінші радиоарналармен сәйкесінше олардың өткізу жолағына немесе бір мезгілде талдау жолағына тең $\{\omega_L, \omega_H\}$ жиіліктер жолағы шегінде жүзеге асырылады. $S_m(t)$ пайдалы сигналының және $S_z(t)$ кедергісінің радиосәулелену көздері кеңістікте алшақтатылған және оларға қатысты d радиопеленгатордың антенналық базасына қатысты θ_m және θ_z бағыттары $\theta = 360^\circ$ берілген секторда ықтималдылық тығыздығының біркелкі таралуымен тәуелсіз кездейсоқ шамалар болып табылады. Бастапқы шарттарды келесі түрде ұсынған жөн:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= S_{1m}(t) + S_{1z}(t) + n_1(t); \\ U_2(t) &= S_{2m}(t - \tau_s) + S_{2z}(t - \tau_z) + n_2(t). \end{aligned} \quad (1)$$

мұндағы τ_s , τ_z – сәйкесінше пайдалы сигнал мен кедергінің пеленгациялық арналар арқылы қабылдануының салыстырмалы кідіріс уақытының априорлы белгісіз шамалары (бұдан әрі – сәйкесінше пайдалы сигнал мен кедергінің кідірісі), $[-\tau_{\max}; \tau_{\max}]$ аралығында ықтималдық тығыздығының біркелкі таралуымен кездейсоқ шамалар болып табылады;

$\tau_{\max} = d / c$ – антенна базасы сызығынан есептелген нөл градус бағытынан радиосәулеленудің келуі жағдайында қалыптасатын, пеленгациялық арналармен радиосәулеленуді қабылдаудың салыстырмалы кідіріс уақытының максималды мәні.

Пайдалы сигнал $S_m(t)$ мен кедергі $S_z(t)$ шуға ұқсас, олардың сәйкесінше $S_m^2(\omega)$ және $S_z^2(\omega)$ қуаттылық спектрлік тығыздықтары біркелкі таралу заңына ие және антенна базасы d олардың толқын ұзындықтарынан үлкен деп есептейік, яғни $d > \lambda_m$, $d > \lambda_z$, мұндағы λ_m – пайдалы сигналдың толқын ұзындығы, λ_z – кедергінің толқын ұзындығы.

Көрсетілген шарттар үшін (1) іздеусіз спектрлік корреляциялық-интерферометриялық пеленгация әдісі, қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының $U_1(j\omega_{IF,k})$ және $U_2(j\omega_{IF,k})$ комплексті спектрлерін екі реттік цифрлық корреляциялық өңдеу арқылы сәйкесінше ω_{IF} радиоарналарының аралық жиілігінде жүзеге асырылады [8, 14–16–бб.].

Корреляциялық өңдеудің бірінші кезеңінде цифрлық түрде уақыттық ығысуды пайдалана отырып, қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының бірінші өзара комплексті спектрі $U_{U1}(j\omega_{IF,k}) = U_1^*(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$ аралық жиілікте талданады.

Корреляциялық өңдеудің екінші кезеңінде $\Delta\omega$ жиіліктік түрлендіргіш ығысуын қолдану арқылы қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының екі еселенген өзара комплексті спектрі $U_{U2}(j\omega_{IF,k}) = (U_1^*(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k}))^* \cdot (U_1^*(j(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)) \cdot U_2(j(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)))$ талданады.

Нәтижесінде теңдеуіне сәйкес, пайдалы сигналдың пеленгациялық арналармен қабылдануының салыстырмалы кідіріс уақытының $\hat{\tau}_s$ тікелей іздеусіз бағасын (бұдан әрі – пайдалы сигнал кідірісінің $\hat{\tau}_s$ бағасы) анықтау мүмкіндігі қамтамасыз етіледі:

$$\tilde{\tau}_s = (1/\Delta\omega) \cdot \arctg \left[\frac{\sum_{k=k_L}^{k_H} A_1(\omega_{IF,k}) \cdot A_2(\omega_{IF,k}) \cdot A_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot A_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta,k}]}{\sum_{k=k_L}^{k_H} A_1(\omega_{IF,k}) \cdot A_2(\omega_{IF,k}) \cdot A_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot A_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta,k}]} \right] \quad (2)$$

мұндағы k_L, k_H – сәйкесінше ω_{IF} радиоарналарының аралық жиілігіндегі сигналдар спектрлерінің төменгі $\omega_{IF,L}$ және жоғарғы $\omega_{IF,H}$ шекті жиіліктеріне сәйкес келетін сигнал спектрінің жиіліктік құраушыларының нөмірлері;

$k \in [0; (N/2) - 1]$ – кіріс радиосәулеленудің аддитивті қоспаларының жиіліктік спектрлік құраушыларының нөмірлері;

N – талдау процесінің уақытында қабылданған радиосәулеленудің аддитивті қоспасының есептеулерінің саны;

$A_1(\omega_{IF,k}), A_2(\omega_{IF,k})$ – бірінші және екінші радиоарналардағы ω_{IF} аралық жиілігінде қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының амплитудалық спектрлері;

$A_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega), A_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$ – бірінші және екінші радиоарналардағы жиіліктік ығысудан кейін ω_{IF} аралық жиілігінде қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының амплитудалық спектрлері;

$\Delta\varphi_{\Delta,k} = \Delta\varphi(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) - \Delta\varphi(\omega_{IF,k})$ – қос айырымдық фазалық ығысу;

$\Delta\omega$ – спектрлердің бірінші туындысының жиіліктік түрлендіргіш ығысуының мәні, спектрлік талдаудың жиіліктік қадамына еселік;

$\nu = \arctg(\cdot)$ функциясы үшін екіұштылықты түзету коэффициенті: $\cos(\Delta\varphi) > 0$ болғанда $\nu = 0$; $\cos(\Delta\varphi) < 0$ болғанда $\nu = -1$.

Алынған $\tilde{\tau}_s$ бағасын ескере отырып, пайдалы сигналдың кідірісінің $\sigma_{\tilde{\tau}_s}^2$ пеленгі бағалау қателігінің дисперсиясы келесі түрде анықталады:

$$\sigma_{\tilde{\tau}_s}^2 = c^2 \cdot \sigma_{\tilde{\tau}}^2 / d \cdot \cos^2 \theta \quad (3)$$

мұндағы $\sigma_{\tilde{\tau}_s}^2$ – пайдалы сигнал кідірісін бағалау қателігінің дисперсиясы.

(3) теңдеуін талдау көрсеткендей, қабылданған $S_z(t)$ аддитивті кедергісі және пеленгациялық арналардың $n_1(t)$ мен $n_2(t)$ меншікті шулары пеленгация қателігінің $\sigma_{\tilde{\tau}_s}^2$ дисперсиясының тек бір құраушысына, яғни пайдалы сигнал кідірісін бағалау қателігінің $\sigma_{\tilde{\tau}}^2$ дисперсиясына ғана тікелей әсер етеді [9, 5–8-бб.]. Сондықтан, бұл параметрді оның бастапқылығы мен әмбебаптығын ескере отырып, пеленгатордың кедергіден қорғалу көрсеткіші ретінде пайдалану орынды.

Пеленгациялық арналардың $n_1(t)$ мен $n_2(t)$ меншікті шулары және $S_z(t)$ кедергісі статистикалық тәуелсіз екенін ескере отырып, пайдалы сигнал кідірісін бағалау қателігінің σ_F^2 дисперсиясы екі құраушымен анықталады: шуылдық және кедергілік:

$$\sigma_F^2 = \sigma_{F1}^2 + \sigma_{F2}^2 \quad (4)$$

мұндағы σ_{F1}^2 – пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының шуылдық құраушысы;

σ_{F2}^2 – пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының кедергілік құраушысы.

Өз кезегінде, пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының σ_{F1}^2 шуылдық құраушысы теңдеуіне сәйкес анықталады:

$$\sigma_{F1}^2 = 2\pi / \Delta\omega^2 \cdot T_a \cdot \mu \cdot \Delta\omega_s \quad (5)$$

мұндағы μ – пеленгациялық арналардың кірісіндегі қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларындағы сигнал/шуыл қатынасы;

$\Delta\omega_s$ – пайдалы сигнал спектрінің ені.

(4) және (5) теңдеулерін талдау көрсеткендей, пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының σ_{F1}^2 шуылдық құраушысы үш негізгі фактормен анықталады: μ сигнал/шуыл қатынасымен, T_a талдау процесінің уақытымен және $\Delta\omega_s$ пайдалы сигнал спектрінің енімен. Бұл ретте меншікті шуылдардың әсерінің ықпалын T_a талдау процесінің уақытын ұлғайту арқылы өтеуге болады.

Пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының σ_{F2}^2 кедергілік құраушысын зерттеу үшін пеленгацияны жүзеге асырудың келесі негізгі ЭМЖ нұсқаларын бөліп көрсету орынды: бірінші – $S_m(j\omega_{IF,k})$ пайдалы сигнал спектрі мен $S_z(j\omega_{IF,k})$ кедергі спектрі бір-бірін жаппайды; екінші – $S_m(j\omega_{IF,k})$ пайдалы сигнал спектрі мен $S_z(j\omega_{IF,k})$ кедергі спектрі толығымен бір-бірін жабады; үшінші – $S_m(j\omega_{IF,k})$ пайдалы сигнал спектрі мен $S_z(j\omega_{IF,k})$ кедергі спектрі ішінара бір-бірін жабады [10, 4–7-бб.].

Бөліп көрсетілген ЭМЖ нұсқаларының әрқайсысы үшін кедергілердің келесі түрлерін қарастыру орынды: бірінші – таржолақты кедергі, оның $\Delta\omega_z$ спектрінің ені $\Delta\omega_s$ пайдалы сигнал спектрінің енінен аз, яғни $\Delta\omega_z < \Delta\omega_s$; екінші – кеңжолақты кедергі, оның $\Delta\omega_z$ спектрінің ені $\Delta\omega_s$ пайдалы сигнал спектрінің енінен үлкен болғанда, яғни $\Delta\omega_z > \Delta\omega_s$; үшінші – теңжолақты кедергі, оның спектрінің ені пайдалы сигнал спектрінің еніне тең, яғни $\Delta\omega_z = \Delta\omega_s$.

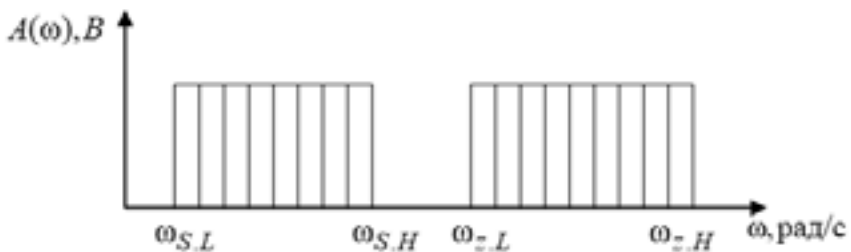
Кедергінің бірінші түрі таржолақты станциялық кедергілердің негізгі сәулеленуінің немесе олардың гармоникалардағы және субгармоникалардағы немесе интермодуляциялықтағы паразит құраушыларының әсеріне сәйкес келеді.

Кедергінің екінші түрі, мысалы, UWB, мультиплекстеуі бар арналарды ортогональды жиіліктік бөлу (OFDM), спектрді кеңейтуді қолданатын сияқты заманауи байланыс құралдары мен ақпарат беру жүйелерінің кеңжолақты станциялық кедергілерінің негізгі сәулеленуінің әсеріне немесе олардың қамту аймағында радиомониторинг жүзеге асыру кезіндегі өнеркәсіптік кедергілердің әсеріне сәйкес келеді [11, 6–13-бб.].

Кедергінің үшінші түрі сәулеленулердің көп сәулелі таралуы және қайта шағылысулар есебінен кедергілердің қалыптасуы кезінде елді мекендердің ЭМЖ үшін типтік болып табылады. Пайдалы сигналмен теңжолақты корреляцияланған және корреляцияланбаған кедергілер, мысалы, ағымдағы уақыт сәтінде пеленгтелетін радиоэлектрондық құралдардың қайта шағылысқан меншікті сәулеленулеріне сәйкес келеді.

ЭМЖ-нің негізгі нұсқаларына сәйкес келетін $U(t)$ аддитивті қоспасының амплитудалық спектрлерінің эпюралары 1-3-суреттерде көрсетілген.

1-суретте пеленгацияны жүзеге асырудың бірінші ЭМЖ нұсқасы көрсетілген, онда $S_m(\omega_{IF,L})$ пайдалы сигналының амплитудалық спектрінің $[\omega_{s,L}; \omega_{s,H}]$ жиіліктер жолағы мен $S_z(\omega_{IF,L})$ кедергісінің амплитудалық спектрінің $[\omega_{z,L}; \omega_{z,H}]$ жиіліктер жолағы бір-бірін жаппайды, яғни $\omega_{s,H} < \omega_{z,L}$.

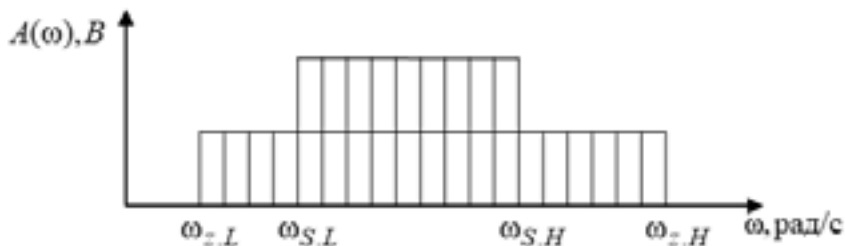


1-сурет – Жиілік бойынша бір-бірін жаппайтын пайдалы сигнал мен кедергінің амплитудалық спектрлерінің эпюралары

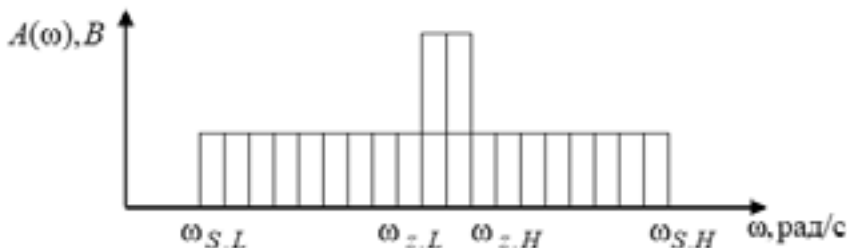
2-суретте және 3-суретте пеленгацияны жүзеге асырудың екінші ЭМЖ нұсқасы ұсынылған, онда пайдалы сигнал мен кедергінің амплитудалық спектрлері толығымен бір-бірін жабады. Бұл ретте 2-суретте $U(t)$ аддитивті қоспасының эпюрасы көрсетілген, оның құрамына пайдалы сигналдың

жиіліктер жолағының $\Delta\omega_s = \omega_{s.H} - \omega_{s.L}$ енінен үлкен, $\Delta\omega_z = \omega_{z.H} - \omega_{z.L}$ жиіліктер жолағының ені бар кеңжолақты кедергі кіреді.

3-суретте $U(t)$ аддитивті қоспасының эпюрасы көрсетілген, оның құрамына пайдалы сигналдың жиіліктер жолағының енінен $\Delta\omega_s$ кіші, $\Delta\omega_z$ жиіліктер жолағының ені бар таржолақты кедергі кіреді.



2-сурет – Жиілік бойынша толығымен бір-бірін жабатын пайдалы сигналдың және кеңжолақты кедергінің амплитудалық спектрлерінің эпюралары



3-сурет – Жиілік бойынша толығымен бір-бірін жабатын пайдалы сигналдың және таржолақты кедергінің амплитудалық спектрлерінің эпюралары

Пайдалы сигнал мен кедергі спектрлері бір-бірін жаппайтын, шектес және ендері бірдей болатын ЭМЖ-нің бірінші нұсқасы үшін пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының σ_{xx}^2 кедергілік құраушысын зерттейік. Зерттеу шарттарын келесі түрде көрсетейік:

$$\begin{cases} \Delta\omega_3 = \Delta\omega_2; \\ \omega_{3H} < \omega_{2L}; \\ \Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2; \\ \Delta\omega_2 \leq \Delta\omega_2 \end{cases} \quad (6)$$

мұндағы $\Delta\omega_a$ – бір мезгілде талдаудың жиіліктер жолағының ені;

$\Delta\omega_k$ – пеленгациялық арналардың өткізу жолағының ені.

Тек кедергінің әсерін ескере отырып, сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардағы аралық жиілікте жылдам Фурье түрлендіруі негізінде қалыптасатын $U_1(j\omega_{IFk})$ және $U_2(j\omega_{IFk})$ комплексті спектрлері келесі түрде анықталады:

$$\begin{aligned} U_1(j\omega_{IFk}) &= S_{1m}(j\omega_{IFk}) + S_{1z}(j\omega_{IFk}) + n_1(j\omega_{IFk}); \\ U_2(j\omega_{IFk}) &= S_{2m}(j\omega_{IFk}) + S_{2z}(j\omega_{IFk}) + n_2(j\omega_{IFk}) \end{aligned} \quad (7)$$

мұндағы $S_{1m}(\omega_{IFk})$, $S_{2m}(\omega_{IFk})$ – сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардың аралық жиілігіндегі пайдалы сигналдардың комплексті спектрлері;

$S_{1z}(\omega_{IFk})$, $S_{2z}(\omega_{IFk})$ – сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардағы кедергінің комплексті спектрлері;

$n_1(\omega_{IFk})$, $n_2(\omega_{IFk})$ – сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардағы меншікті шуылдардың комплексті спектрлері.

Аралық жиілікте қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының $U_1(j\omega_{IFk})$ және $U_2(j\omega_{IFk})$ комплексті спектрлерін екі реттік корреляциялық

өңдеуден кейін, (6) шарттары үшін пайдалы сигнал кідірісінің бағасы (2) және (7) ескеріле отырып, келесі түрде анықталады:

$$\begin{aligned} \hat{r}_2 &= (1/\Delta\omega_2) \cdot \\ &\cdot \arctg \left[\frac{\sum_{k=k_H}^{k_H} S_{1m}(\omega_{IFk}) \cdot S_{2m}(\omega_{IFk}) \cdot S_{1z}(\omega_{IFk} + \Delta\omega) \cdot S_{2z}(\omega_{IFk} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta k}]}{\sum_{k=k_L}^{k_H} S_{1m}(\omega_{IFk}) \cdot S_{2m}(\omega_{IFk}) \cdot S_{1z}(\omega_{IFk} + \Delta\omega) \cdot S_{2z}(\omega_{IFk} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta k}]} \right] \quad (8) \\ &+ \pi \cdot \pi = r_2 - r_k \end{aligned}$$

мұндағы $\Delta\varphi_{\Delta k} = \Delta\varphi_2(\omega_{IFk} + \Delta\omega) - \Delta\varphi_1(\omega_{IFk})$;

$\Delta\varphi_1(\omega_{IF,k}) = \Delta\varphi_{1z}(\omega_{IF,k}) - \Delta\varphi_{1x}(\omega_{IF,k})$ – пайдалы сигналдың өзара спектрінің аргументі;

$\Delta\varphi_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) = \Delta\varphi_{2z}(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) - \Delta\varphi_{2x}(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$ – кедергінің өзара спектрінің аргументі;

$\Delta\varphi_{1z}(\omega_{IF,k}), \Delta\varphi_{2z}(\omega_{IF,k})$ – сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардың аралық жиілігіндегі $S_{1m}(\omega_{IF,k}), S_{2m}(\omega_{IF,k})$ пайдалы сигналының комплексті спектрлерінің аргументтері;

$\Delta\varphi_{1z}(\omega_{IF,k} + \Delta\omega), \Delta\varphi_{2z}(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$ – сәйкесінше бірінші және екінші пеленгациялық арналардың аралық жиілігіндегі $S_{1z}(j(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)), S_{2z}(j(\omega_{IF,k} + \Delta\omega))$ кедергісінің комплексті спектрлерінің аргументтері;

$\Delta\omega = \Delta\omega_0 / 2$ – қайталама корреляциялық өңдеу кезіндегі жиіліктік ығысу.

(8) теңдеуін талдау $U_1(j\omega_{IF,k})$ және $U_2(j\omega_{IF,k})$ комплексті спектрлерін екі реттік корреляциялық өңдеу есебінен қалыптасқан $U_{F2}(j\omega_{IF,k})$ екі еселенген өзара комплексті спектрінің $\Delta\varphi_{\Delta 1,k}$ аргументтері пайдалы сигнал мен кедергінің өзара спектрлері аргументтерінің айырымына тең екенін көрсетеді. Бұл өз кезегінде, пайдалы сигнал кідірісінің $\hat{\varepsilon}_s$ бағасының аномальді үлкен қателігінің пайда болуына себеп болады. Нәтижесінде, кедергінің бұл әсерін пайдалы сигнал туралы кеңістіктік ақпараттың және оған сәйкес пайдалы сигналдың $\hat{\varepsilon}_s$ кідірісінің жоғалуы орын алатын, және соның салдарынан, пайдалы сигнал қуатының P_s және кедергі қуатының P_z арақатынасына тәуелсіз, соның ішінде $P_s / P_z \gg 1$ шартында да пайдалы сигнал қуатының эквивалентті азаюы ретінде «пайдалы сигналдың кеңістіктік бұғатталуы» деп анықтау орынды.

Кедергінің өзара спектрінің $\Delta\varphi_z(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$ аргументінің ықтималдық тығыздығының біркелкі таралу заңын ескере отырып, (8) ескерілгенде пайдалы сигналдың кідірісін бағалау қателігі дисперсиясының σ_{Fz}^2 кедергілік құраушысы құрайды:

$$\sigma_{Fz}^2 = \tau_{\max}^2 / 3 \quad (9)$$

«Кеңістіктік бұғаттау» әсерін аралық жиіліктегі қабылданған $U_1(t)$ және $U_2(t)$ аддитивті қоспаларының $U_1(j\omega_{IF,k})$ және $U_2(j\omega_{IF,k})$ комплексті спектрлерінен $U_z(j\omega_{IF,k})$ кедергісінің спектрлік құраушыларын, мысалы, амплитудалық немесе кеңістіктік алдын ала селекциялау арқылы тиімді жоюға болады.

Нәтижелер және талқылау

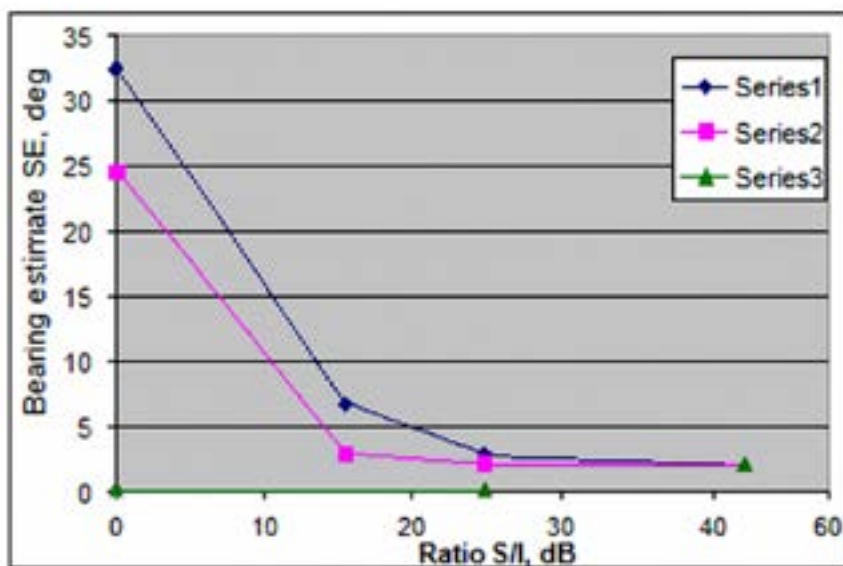
Келесі бастапқы шарттар үшін MathCad ортасында әзірленген бағдарламалық модельдің көмегімен кеңейтілген спектрлі радиосәулеленулерді екі реттік корреляциялық өңдеуі бар іздеусіз спектрлік корреляциялық-интерферометриялық радиопеленгатордың кедергіден

қорғалуына зерттеулер жүргізілді: ЭМЖ нұсқалары – пайдалы сигнал мен кедергі спектрлерінің толық және ішінара жабылуы; пайдалы сигнал мен кедергінің түрі – сызықтық жиіліктік модуляциясы бар үздіксіздер: $S(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + b t^2) S(t)$; кедергі спектрінің ені $\Delta f_{\Sigma} = 0.5 \text{ МГц}$; $\Delta f_{\Sigma} = 5 \text{ МГц}$; сигнал спектрінің ені $\Delta f_s = 5 \text{ МГц}$; сигналдың жұмыс жиілігі $f_s = 2 \text{ ГГц}$; кедергінің жұмыс жиілігі $f_i = 2.002 \text{ ГГц}$; радиоқабылдағыштың өткізу жолағының ені $\Delta F_p = 10 \text{ МГц}$; дискреттеу жиілігі $f_d = 20 \text{ МГц}$; сигналдың келуінің берілген бағыты $\theta_1 = 80^\circ$; кедергінің келуінің берілген бағыты $\theta_2 = 20^\circ$; сигналдық есептеулердің саны $N_s = 16384$; талдау процесінің уақыты $T_s = N_s / f_d = 16384 / 20 \cdot 10^6 \text{ ГГц} = 0.8 \text{ мс}$; меншікті шуылдың қуаты P_n кедергінің қуатынан P_2 әлдеқайда аз: $P_n \ll P_2$. Алынған S/z сигнал/кедергі қатынасынан пеленгті бағалаудың σ_θ орташа квадраттық ауытқуының (ОКА) тәуелділіктер тобы 4-суретте көрсетілген.

4-суреттегі тәуелділіктер тобының 1-қатары спектрі 0.5 МГц жиіліктер жолағы шегінде пайдалы сигнал спектрімен толығымен жабылатын тар жолақты кедергінің әсері кезіндегі пеленгация шарттарының ЭМЖ нұсқасына сәйкес келеді. 1-қатардың тәуелділігі пайдалы сигналдың P_s қуаты артқан кезде $y = 1/x$ гиперболалық заңына сәйкес келеді.

4-суреттегі тәуелділіктер тобының 2-қатары тең жолақты кедергінің әсері кезіндегі пеленгация шарттарының ЭМЖ нұсқасына сәйкес келеді: $\Delta \omega_s = \Delta \omega_i$; оның спектрі $\Delta \omega_{\Sigma} / 2\pi = 3 \text{ МГц}$ жиіліктер жолағы шегінде пайдалы сигнал спектрімен ішінара жабылады. Бұл пеленгация шарттары үшін $\Delta \omega_{sB} / 2\pi = 2 \text{ МГц}$ ені бар пайдалы сигнал спектрінің жиіліктер жолағы шегінде «кеңістіктік бұғаттау» әсерінің айтарлықтай ықпалы тән.

4-суреттегі 1-қатар мен 2-қатар тәуелділіктерін салыстырмалы талдау көрсеткендей, сигнал/кедергі қатынасы өзгермеген кезде, спектрі пайдалы сигнал спектрімен ішінара сәйкестендірілген кедергінің әсері кезінде зерттелетін радиопеленгатордың кедергіден қорғалуы едәуір нашарлайды. Бұл оның бұғаттаушы әсерімен және бұғаттау жиіліктер жолағының $\Delta \omega_{sB}$ еніне пропорционалды пеленгатордың шығысындағы пайдалы сигнал деңгейінің сәйкесінше эквивалентті азаюымен байланысты.



4-сурет – Пеленгті бағалаудың σ_{θ} ОКА-ның (орташа квадраттық ауытқуының) S/I сигнал/кедергі қатынасынан тәуелділіктер тобы:

1-қатар – $\Delta f_{z1} = 0.5 \text{ МГц}$ кезінде; 2-қатар – $\Delta f_{z2} = 5 \text{ МГц}$ кезінде;

3-қатар – алдын ала селекцияланған кедергі кезінде

4-суреттегі тәуелділіктер тобының 3-қатары 1-қатардың бастапқы шарттарына сәйкес келеді, бірақ кедергіні кеңістіктік алдын ала селекциялауды қолданғанда. Нәтижесінде зерттелетін пеленгатордың кедергіден қорғалуы едәуір жақсарады және тек пеленгациялық арналардың меншікті шуылдарының әсерімен анықталады. Бұл ретте, кедергі спектрінің жиіліктер жолағының $2\Delta\omega_z$ қос еніне пропорционалды пайдалы сигналдың белгілі бір энергетикалық шығындары және пеленгация дәлдігінің сәйкесінше нашарлауы бәрібір сақталады. Бұл радиосәулеленулерді екі реттік корреляциялық өңдеуі бар іздеусіз пеленгация әдісін жүзеге асыру кезінде кедергілерді алдын ала кеңістіктік селекциялауды қолданудың перспективалы екенін растайды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Осы жұмыс «Жас ғалым» ғылыми жобаларын гранттық қаржыландыру бағдарламасы аясында АР25794385 «Машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы пассивті радиопеленгацияның спектрлік-корреляциялық алгоритмді әзірлеу және енгізу» тақырыбы бойынша орындалды.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, косарланған корреляциялық өңдеумен жүзеге асырылатын іздеусіз спектралды корреляциялық-интерферометриялық радиопеленгаторда пеленгация дәлдігінің төмендеуіне сыртқы аддитивті кедергілер шешуші әсер етеді, ал олардың ықпалы ішкі шудан әлдеқайда басым. Ең қауіпті жағдайларға теңжолалы кедергілердің пайдалы сигнал спектрімен толық немесе кеңжолалы кедергілермен толық қабаттасуы жатады, мұндай кезде «кеңістіктік блоктау» құбылысы туындап, қателіктің аномальды өсуіне әкеледі. Басқа электромагниттік орта жағдайларында кедергіге төзімділік сигнал/кедергі қатынасына және спектрлердің салыстырмалы еніне тәуелді болады. Радиопеленгатордың тұрақтылығын арттырудың перспективті бағыты – қабылдау кезеңінде немесе спектрлік талдау барысында амплитудалық, кеңістіктік немесе поляризациялық селекцияны қолдану. Алынған нәтижелер радиомониторинг және радионавигация жүйелерінде практикалық тұрғыда қолдануға жарамды әрі іздеусіз спектралды корреляциялық-интерферометриялық пеленгация әдістерін жетілдірудің жалғасы болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Knapp, C. H., Carter, G. C.** The generalized correlation method for estimation of time delay // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1976. – 24(4). – P. 320–327. – <https://doi.org/10.1109/TASSP.1976.1162830>

2 **Fridman, P. A., Baan, W. A.** RFI mitigation methods in radio astronomy // Astronomy & Astrophysics. – 2001. – 378. – P. 327–344. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011166>

3 **Stock, M. G., Akita, M., Krehbiel, P. R., Rison, W., Edens, H. E., Kawasaki, Z., Arai, T.** Continuous broadband digital interferometry of lightning using a generalized cross-correlation algorithm // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – 119(6). – P. 3134–3165. – <https://doi.org/10.1002/2013JD020217>

4 **Magiera, J.** Detection and Direction-of-Arrival Estimation of Weak Spread Spectrum Signals Received with Antenna Array // Electronics. – 2021. – 10(21). – Article 2566. – <https://doi.org/10.3390/electronics10212566>

5 **Eranti, P. K., Barkana, B. D.** A Review of Direction of Arrival (DOA) Estimation Methods Based on Adaptive Time-Frequency Distributions // Electronics. – 2022. – 11(9). – Article 1321. – <https://doi.org/10.3390/electronics11091321>

6 Qu, X., Ji, Z., Liu, Y., Wang, H., Wang, C. Direction finding for radio transmitters with mini-array interferometric imaging // Radio Science. – 2019. – 54(2). – P. 181–194. – <https://doi.org/10.1029/2018RS006598>

7 Stock, M. G., Rison, W., Krehbiel, P. R., Rioussset, J. A., Thomas, R. J. Continuous broadband digital interferometry of lightning using generalized cross correlation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – 119(6). – P. 3134–3165. – <https://doi.org/10.1002/2013JD020217>

8 Mollai, S., Khalaj-Amirhosseini, M., Shafiee, M. Wideband two-dimensional interferometric direction finding // Journal of Applied Research and Technology. – 2019. – 17(1). – P. 12–20. – <https://doi.org/10.22201/icat.16656423.2019.17.1.12>

9 Liu, H., Wang, D., Dong, W., Zhang, Y., Sun, Z. A time delay calibration technique for improving broadband lightning interferometer locating // Remote Sensing. – 2023. – 15(11). – Article 2817. – <https://doi.org/10.3390/rs15112817>

10 Magiera, J., Susek, W. Performance analysis of interferometric direction-finding methods for weak GNSS signals // Sensors. – 2022. – 22(14). – Article 5183. – <https://doi.org/10.3390/s22145183>

11 Fridman, P. A. Radio astronomy interferometers: interference mitigation and direction finding // Experimental Astronomy. – 2016. – 41. – P. 1–17. – <https://doi.org/10.1007/s10686-015-9474-y>

22.12.25 ж. баспаға түсті.

28.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. М. Сабиболда¹, А. К. Тулешов², А. Б. Сагындык³,

*Ж. М. Досбаев⁴, *Н. К. Смайлов⁵*

^{1,2,4,5}Институт механики и машиноведения

имени академика У. А. Джолдасбекова,

Республика Казахстан, г. Алматы;

³Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{1,4,5}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 22.12.25.

Поступило с исправлениями 28.01.26.

Принято в печать 22.05.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО- ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОПЕЛЕНГАТОРА ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В статье исследуется помехоустойчивость поисконезависимого спектрального корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора (СКИР), реализующего двойную корреляционную обработку радиосигналов с расширенным спектром, в условиях сложной электромагнитной обстановки (ЭМО). Рассмотрены статистические модели аддитивных смесей, принимаемых в процессе пеленгации, с учетом спектрального взаимного расположения полезного сигнала и различных типов помех (узкополосных, широкополосных и равнополосных). В результате теоретического анализа показано, что дисперсия ошибки пеленгации зависит от отношения сигнал/шум и сигнал/помеха, времени анализа, а также ширины спектра полезного сигнала. Особое внимание уделено явлению «пространственной блокировки», возникающему при полном или частичном перекрытии спектров полезного сигнала и помехи, что приводит к аномальному ухудшению точности пеленгации. В работе использована математическая модель радиопеленгатора с двумя пеленгационными каналами, на основе которой для основных вариантов электромагнитной обстановки проанализированы шумовая и помеховая составляющие дисперсии ошибки. Результаты численного моделирования, выполненного в среде MathCad, подтвердили корректность полученных теоретических зависимостей и показали решающее влияние спектральных характеристик помех на точность пеленгации. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности радиомониторинговых и радионавигационных систем в сложной электромагнитной обстановке и определяют перспективы дальнейшего совершенствования поисконезависимых спектральных корреляционно-интерферометрических методов пеленгации при обработке широкополосных сигналов.

Ключевые слова: радиопеленгация, спектральная корреляция, корреляционный алгоритм, электромагнитные помехи, широкополосный сигнал, пространственная блокировка.

A. M. Sabibolda¹, A. K. Tuleshov², A. B. Sagyndyk³,

Zh. M. Dosbayev⁴, *N. K. Smailov⁵

^{1,2,4,5}Institute of Mechanics and Engineering

named after Academician U.A. Zholdasbekov,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{1,4,5}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 22.12.25.

Received in revised form 28.01.26.

Accepted for publication 22.05.26.

RESEARCH OF INTERFERENCE IMMUNITY OF A SPECTRAL CORRELATION-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDER FOR WIDEBAND SIGNALS

This paper investigates the interference immunity of a search-free spectral correlation-interferometric direction finder (SCIF) implementing double correlation processing of spread-spectrum radio emissions under complex electromagnetic environment (EME) conditions. Statistical models of additive mixtures received during the direction-finding process are considered, taking into account the spectral arrangement of the useful signal and various types of interference, including narrowband, wideband, and equal-band interferers. The theoretical analysis demonstrates that the variance of the direction-finding error depends on the signal-to-noise and signal-to-interference ratios, the analysis time, and the bandwidth of the useful signal. Special attention is paid to the phenomenon of “spatial blocking”, which occurs when the spectra of the useful signal and interference partially or fully overlap, leading to an anomalous degradation of direction-finding accuracy. A mathematical model of a direction finder with two direction-finding channels is employed to analyze the noise and interference components of the error variance for the main electromagnetic environment scenarios. Numerical simulations performed in the MathCad environment confirm the validity of the theoretical results and demonstrate the decisive influence of interference spectral characteristics on direction-finding accuracy. The obtained results can be applied to enhance the performance of radio monitoring and radionavigation systems operating in complex electromagnetic environments and indicate promising directions for further development of search-free spectral correlation-interferometric direction-finding methods for wideband signal processing.

Keywords: radio direction finding, spectral correlation, correlation algorithm, electromagnetic interference, wideband signal, spatial blocking.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz