УДК 629.735.015:681.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА И ПОМЕХИ ОТ БЛИЗКИХ ИСТОЧНИКОВ

С.А. ИВАНОВ, Д.А. САВИН

На основе сравнительного анализа известных методов компенсации помех выводятся соотношения для получаемых с их помощью угловых измерений. Проведен математический модельный эксперимент по оценке зависимости ошибки измерений от взаимного положения источников помех и полезного сигнала. Рассмотрен и экспериментально проверен модифицированный метод компенсации помех. Анализ полученных угловых измерений для рассматриваемых методов показывает, что модифицированный метод компенсации позволяет получить более точные оценки. Анализируемые методы позволяют в значительной мере исключить полезный сигнал из дополнительного канала антенны, что уменьшает возникающие ошибки угловых рассогласований.

Определить степень влияния возникающих ошибок на процесс радиолокационного сопровождения аналитически не всегда возможно, и в дальнейшем сравнение эффективности различных методов компенсации помех предполагается проводить с помощью математического моделирования замкнутого контура сопровождения РЛС.

Ключевые слова: подавление шумовых помех, полезный сигнал, принцип компенсации, канал, угловые измерения.

ВВЕДЕНИЕ

В местах скопления людей, таких как современные аэропорты, повсеместно используется сотовая связь, которая становится источником помех для радиолокации, навигации и связи. В частности, затрудняется маневрирование на площади аэродрома, где помехи от разговоров пассажиров усугубляются сеансами служебной связи, работой высотомеров, приводных маяков и других радиотехнических устройств. В нештатных ситуациях подобные помехи могут привести к катастрофам и человеческим жертвам. Алгоритмы подавления шумовых помех являются важной составной частью разработки аэродромных радиолокационных станций (РЛС).

Одним из направлений теории и техники подавления шумовых помех является принцип компенсации, наиболее четко сформулированный в [1] и адаптированный для практических приложений (устройств) в [2]. Традиционный метод для компенсации помех в основном канале $u_0(t)$ использует сигнал дополнительного канала $u_д(t)$ (компенсационного канала), получаемого от одной или нескольких дополнительных антенн (датчиков), где полезный сигнал существенно ослаблен по сравнению с помехой.

$$\begin{aligned} u_0(t) &= \sqrt{P_{со}}\,s(t) + \sqrt{P_{по}}\,n(t), \\ u_д(t) &= \sqrt{P_{сд}}\,s(t) + \sqrt{P_{пд}}\,n(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $s(t), n(t)$ – нормированные представления полезного сигнала и помехи,

$P_{со}, P_{по}, P_{сд}, P_{пд}$, – мощности полезного сигнала и помехи по основному и дополнительному каналам соответственно, причем

$$\frac{P_{со}}{P_{по}} >> \frac{P_{сд}}{P_{пд}}.$$

В приложении к аэродромным РЛС выполнение соотношения (1) достигается выбором антенн с разными диаграммами направленности (ДНА) по основному и вспомогательным каналам. Определенная линейная комбинация основного и вспомогательного канала позволяют добиться необходимого подавления помехи, которое невозможно обеспечить прямыми методами фильтрации.

КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ

В случае малого углового расстояния между источником полезного сигнала и помехи оба сигнала будут приходить по главному лепестку диаграммы ДНА. Тогда соотношение (1), вообще говоря, может не выполняться, что приведет к искажению угловых измерений источника полезного сигнала после компенсации.

Действительно, сигналы от источника полезного сигнала и помехи, принимаемые суммарным (далее индекс Σ), разностными (индексы *Y*, *Z*) и дополнительным (компенсационным, индекс *C*) каналами антенны можно представить в виде следующих соотношений:

$$U_\Sigma = A_1 G_0 F_\Sigma(\varepsilon_1) + A_2 G_0 F_\Sigma(\varepsilon_2), \qquad U_Z = A_1 G_0 F_Z(\varepsilon_{Z1}) + A_2 G_0 F_Z(\varepsilon_{Z2}),$$
$$U_Y = A_1 G_0 F_Y(\varepsilon_{Y1}) + A_2 G_0 F_Y(\varepsilon_{Y2}), \qquad U_c = A_1 G_c F_c(\varepsilon_1) + A_2 G_c F_c(\varepsilon_2),$$

где U_Σ, U_Y, U_Z, U_c – сигналы в суммарном, разностных и компенсационном каналах;

A_1, A_2 – комплексные амплитуды сигналов на входе антенного тракта;

F_Σ, F_Y, F_Z, F_c – нормированные коэффициенты ДНА суммарного, разностных и компенсационного каналов;

G_0, G_c – коэффициенты усиления основной и дополнительной антенн;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – угловые отклонения направлений на источники сигналов от главной оси основной антенны;

$\varepsilon_{Y1}, \varepsilon_{Y2}, \varepsilon_{Z1}, \varepsilon_{Z2}$ – проекции угловых отклонений направлений на источники сигналов от главной оси основной антенны на ее оси Y и Z.

Так как при наблюдении площади аэродрома основная антенна (ОА) следит за источником полезного сигнала, перемещающимся в узком секторе (взлетно-посадочная полоса и рулежные дорожки), и угловое расстояние между источниками помехи и полезного сигнала мало, справедливы следующие приближения:

$$F_\Sigma(\varepsilon_1) \approx 1, \qquad F_Y(\varepsilon_{Y2}) \approx \mu\varepsilon_{Y2}, \qquad U_\Sigma = A_1 G_0 + A_2 G_0,$$
$$F_\Sigma(\varepsilon_2) \approx 1, \qquad F_Z(\varepsilon_{Z1}) \approx \mu\varepsilon_{Z1}, \qquad U_Y = A_1 G_0 \mu\varepsilon_{Y1} + A_2 G_0 \mu\varepsilon_{Y2},$$
$$F_Y(\varepsilon_{Y1}) \approx \mu\varepsilon_{Y1}, \qquad F_Z(\varepsilon_{Z2}) \approx \mu\varepsilon_{Z2}, \qquad U_Z = A_1 G_0 \mu\varepsilon_{Z1} + A_2 G_0 \mu\varepsilon_{Z2}.$$

Здесь μ – крутизна пеленгационной характеристики антенны. Формализацию поясняет рис. 1. Будем полагать, что дополнительная антенна смещена относительно центра основной антенны на расстояния l_y, l_z по осям Y и Z соответственно. Условные обозначения: K – дополнительная (компенсационная) антенна, окружностью представлена основная антенна. Пусть оси дополнительной и основной антенн совпадают, а ДНА по напряжению для дополнительной антенны описывается функцией $\frac{\sin(k\alpha)}{k\alpha}$, где α – угол между главной осью антенны и направлением на источник сигнала; *k* выбирается при расчетах из условия, чтобы ширина ДНА по уровню 0,5 была равна 60°.

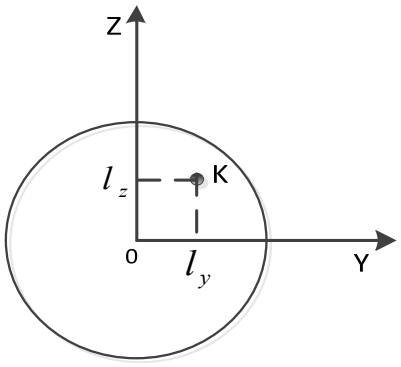

Рис. 1. Расположение дополнительной антенны

Из геометрии расположения основной и дополнительной антенн видно, что сигналы, принимаемые дополнительной антенной, имеют фазовые сдвиги *φ* от сигнала ОА следующего вида:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\left(R_c - R_0\right),$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала; R_0 – расстояние от источника сигнала до головной антенны; R_c – расстояние от источника сигнала до дополнительной антенны.

С учетом фазовых сдвигов ДНА дополнительной антенны представляется как комплексная функция следующего вида: $F_c = \frac{\sin k\alpha_c}{k\alpha_c}\exp\left(j\phi\right)$. Учитывая небольшие размеры антенны по сравнению с дальностью до источника сигнала, можно полагать: $\alpha_c = \alpha$, где α – угол между главной осью ОА и направлением на источник сигнала, α_c – угол между главной осью дополнительной антенны и направлением на источник сигнала. Вычислим фазовый сдвиг в дополнительном канале. Пусть $\vec{e} = (\cos\varepsilon_y \cos\varepsilon_z, \sin\varepsilon_z - \cos\varepsilon_z \sin\varepsilon_y) \approx (1, \varepsilon_z - \varepsilon_y)$ – единичный вектор направления на источник сигнала, а $\vec{r} = \left(0, l_y, l_z\right)$ – вектор, определяющий пространственное положение дополнительной антенны относительно основной. Тогда фазовая задержка φ примет вид

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{e}\cdot\vec{r} = \frac{2\pi}{\lambda}(l_y\varepsilon_z - l_z\varepsilon_y).$$

Окончательно выражение для ДНА дополнительного канала будет иметь вид

$$F_c = \frac{\sin k\alpha}{k\alpha}\exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(l_y\varepsilon_z - l_z\varepsilon_y\right)\right)\right).$$

С учетом малого углового расстояния между источниками полезного сигнала и помехи, в случае, когда аэродромная РЛС сопровождает источник полезного сигнала по угловым координатам, можно принять

$$F_c = \exp\left(j\phi\right), \text{ где } \phi = \frac{2\pi}{\lambda}\left(l_y\varepsilon_z - l_z\varepsilon_y\right).$$

Тогда выражения для сигналов, принимаемых суммарным, разностными и компенсационным каналами от источника полезного сигнала и помехи, принимают вид

$$U_\Sigma = A_1G_0 + A_2G_0, \qquad U_Z = A_1G_0\mu\varepsilon_{Z1} + A_2G_0\mu\varepsilon_{Z2},$$

$$U_Y = A_1G_0\mu\varepsilon_{Y1} + A_2G_0\mu\varepsilon_{Y2}, \qquad U_c = A_1G_c\exp\left(j\varphi_1\right) + A_2G_c\exp\left(j\varphi_2\right),$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – фазовые задержки от источника полезного сигнала и помехи в дополнительном канале.

Коэффициенты компенсации k_Σ, k_Y, k_Z для суммарного и разностных каналов примут вид

$$k_\Sigma = \frac{G_0}{G_c\exp^{j\varphi_2}},\ k_Y = \frac{G_0\mu\varepsilon_{Y2}}{G_c\exp^{j\varphi_2}},\ k_Z = \frac{G_0\mu\varepsilon_{Z2}}{G_c\exp^{j\varphi_2}}.$$

Формулы для сигналов в компенсированных суммарном и разностных каналах преобразуются к виду

$$U_{\Sigma}^{'} = U_{\Sigma} - k_{\Sigma}U_c = A_1G_0\left(1 - \frac{\exp(j\varphi_1)}{\exp(j\varphi_2)}\right) = A_1G_0\left(1 - \exp\left(j(\varphi_1 - \varphi_2)\right)\right),$$

$$U_Y^{'} = U_Y - k_YU_c = \mu A_1G_0\left(\varepsilon_{Y1} - \frac{\varepsilon_{Y2}\exp(j\varphi_1)}{\exp(j\varphi_2)}\right) = A_1G_0\left(\varepsilon_{Y1} - \varepsilon_{Y2}\exp\left(j(\varphi_1 - \varphi_2)\right)\right),$$

$$U_Z^{'} = U_Z - k_ZU_c = \mu A_1G_0\left(\varepsilon_{Z1} - \frac{\varepsilon_{Z2}\exp(j\varphi_1)}{\exp(j\varphi_2)}\right) = A_1G_0\left(\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2}\exp\left(j(\varphi_1 - \varphi_2)\right)\right).$$

Угловые измерения $\hat{\varepsilon}_Y, \hat{\varepsilon}_Z$ вычисляются по формулам

$$\hat{\varepsilon}_Y = \frac{U_Y}{\mu U_{\Sigma}} = \frac{\varepsilon_{Y1} - \varepsilon_{Y2}m}{(1-m)}, \quad \hat{\varepsilon}_Z = \frac{U_Z}{\mu U_{\Sigma}} = \frac{\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2}m}{(1-m)}, \text{где } m = e^{j(\phi_1 - \phi_2)}.$$

По полученным формулам видно, что ошибка оценки угловых рассогласований зависит от фазовой задержки между полезным сигналом и помехой. В случае если фазовые задержки связаны соотношением $\varphi_1 = \varphi_2 + 2\pi k, k = 0, 1, 2 ...,$ предлагаемая оценка будет совпадать с истинным угловым рассогласованием источника полезного сигнала, однако на практике подобная связь не достигается. При других соотношениях ϕ_1 оценка угловых рассогласований источника полезного сигнала будет иметь некоторое смещение. Следует также отметить, что приведенные выше формулы не учитывают влияние тепловых шумов приемника на процесс компенсации.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ

Рассмотрим модифицированный алгоритм компенсации помех, заключающийся в предварительном преобразовании дополнительного канала определенным образом и основанный на двух предпосылках:

1) аэродромная РЛС осуществляет угловое сопровождение источника полезного сигнала, следовательно, его угловые рассогласования малы;

2) значения коэффициентов усиления основной и дополнительной антенн известны с достаточной точностью.

Введенные допущения позволяют сформировать новый дополнительный канал $U_c^{'}$ из первоначального: $U_c^{'} = U_c - \frac{G_c}{G_0}U_{\Sigma}$.

Нетрудно видеть, что в новом дополнительном канале полезный сигнал будет отсутствовать или, по крайней мере, уменьшен с точностью до ошибок в априорной оценке отношения коэффициентов усиления антенн. При этом увеличение собственных шумов незначительно, так как $|\frac{G_0}{G_c}| < 1$.

Рассмотрим искажение полезного сигнала при компенсации новым дополнительным каналом. Как и в предыдущем пункте, сигналы в исходных каналах имеют вид

$$U_\Sigma = A_1 G_0 + A_2 G_0, \qquad U_Z = A_1 G_0 \mu\varepsilon_{Z1} + A_2 G_0 \mu\varepsilon_{Z2},$$
$$U_Y = A_1 G_0 \mu\varepsilon_{Y1} + A_2 G_0 \mu\varepsilon_{Y2}, \qquad U_c = A_1 G_c \exp(j\varphi_1) + A_2 G_c \exp(j\varphi_2).$$

Сформируем новый компенсационный канал:

$$U_c^{'} = U_c - \frac{G_c}{G_0} U_\Sigma = A_1 G_c \left(e^{j\varphi_1} - 1\right) + A_2 G_c \left(e^{j\varphi_2} - 1\right).$$

Коэффициенты компенсации для основных каналов примут вид

$$k_\Sigma = \frac{G_0}{G_c\left(e^{j\varphi_2} - 1\right)}, \; k_Y = \frac{G_0 \mu\varepsilon_{Y2}}{G_c\left(e^{j\varphi_2} - 1\right)}, \; k_Z = \frac{G_0 \mu\varepsilon_{Z2}}{G_c\left(e^{j\varphi_2} - 1\right)}.$$

Скомпенсируем основные каналы:

$$U_\Sigma^{'} = U_\Sigma - k_\Sigma U_c = A_1 G_0 \left(1 - \frac{e^{j\phi_1} - 1}{e^{j\phi_2} - 1}\right),$$
$$U_Y^{'} = U_Y - k_Y U_c = \mu A_1 G_0 \left(\varepsilon_{Y1} - \varepsilon_{Y2} \frac{e^{j\phi_1} - 1}{e^{j\phi_2} - 1}\right),$$
$$U_Z^{'} = U_Z - k_Y U_c = \mu A_1 G_0 \left(\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2} \frac{e^{j\phi_1} - 1}{e^{j\phi_2} - 1}\right).$$

Угловые измерения $\hat{\varepsilon}_Y, \hat{\varepsilon}_Z$ вычисляются по формулам

$$\hat{\varepsilon}_Y = \frac{U_Y}{\mu U_\Sigma} = \frac{\varepsilon_{Y1} - \varepsilon_{Y2} m}{(1 - m)}, \; \hat{\varepsilon}_Z = \frac{U_Z}{\mu U_\Sigma} = \frac{\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2} m}{(1 - m)}, \text{ где } m = \frac{e^{j\phi_1} - 1}{e^{j\phi_2} - 1}.$$

Важно отметить, что при сформулированных условиях, если РЛС точно сопровождает источник полезного сигнала, ошибка оценки угловых рассогласований отсутствует, так как фазовая задержка полезного сигнала φ_1 в дополнительном канале равна нулю. Однако из-за ошибок сопровождения фазовые задержки будут иметь место, что не позволит полностью исключить полезный сигнал из компенсационного канала, что, в свою очередь, вызовет искажение полезного сигнала при компенсации. В случае если антенна направлена на источник помехи $(\phi_2 = 0)$, угловые измерения не будут определены.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ

Для оценки качества работы классического и модифицированного методов компенсации при малом угловом расстоянии между источником полезного сигнала и помехи произведен математический эксперимент, имитирующий стендовые испытания, в которых антенна находится на неподвижном основании, ее привод отключен, а перед ней на некотором угловом расстоянии находятся имитаторы источника полезного сигнала и помехи.

Задача эксперимента состоит в получении зависимости формируемых угловых измерений источника полезного сигнала от относительного углового положения источников полезного сигнала и помехи и выбранного метода компенсации. Источник помехи располагается на фиксированном угловом расстоянии от источника полезного сигнала и перемещается вокруг него с некоторой скоростью (рис. 2). Входные данные эксперимента указаны в таблице.

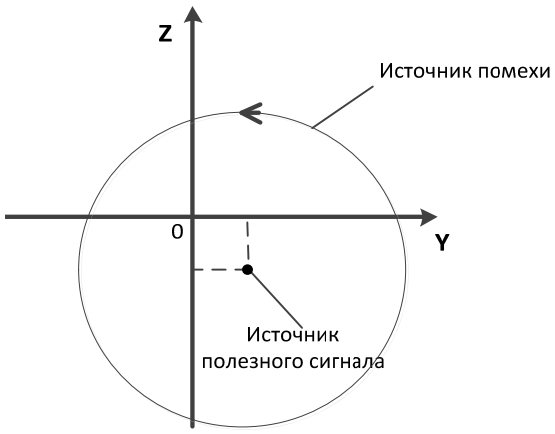

Рис. 2. Расположение источников сигнала и помехи в антенной системе координат

Начальные данные для моделирования	
Наименование параметра	**Значение**
Амплитуда полезного сигнала, дБ	40
Амплитуда шума, дБ	100
Угловое рассогласование полезного сигнала по оси Y, град.	1
Угловое рассогласование полезного сигнала по оси Z, град	–1
Угловое расстояние между источниками полезного сигнала и помехи, град.	5
Угловая скорость вращения источника помехи, град/с	5

На рис. 3, 4 приведены графики, полученные в процессе эксперимента с использованием классического метода компенсации. Красным цветом (в черно-белом варианте – горизонтальная линия) отображено угловое положение источника полезного сигнала в соответствующих плоскостях, фиолетовым цветом (гладкая знакопеременная кривая) представлено угловое положение источника помехи, а синим цветом (скачкообразная кривая) – получаемые угловые измерения источника полезного сигнала. По оси ординат отложены угловые измерения, по оси абсцисс – время в секундах. На рис. 3 (измерения по оси Y) угловое положение полезного сигнала фиксируется на уровне +1º, угловое положение источника помехи в диапазоне [–4, +6], угловые измерения источника полезного сигнала в диапазоне [–4, +4]. Соответственно, на рис. 4 (измерения по оси Z) угловое положение полезного сигнала фиксируется на уровне –1º, угловое положение источника помехи в диапазоне [–6, +4], угловые измерения источника полезного сигнала в диапазоне [–4, +4].

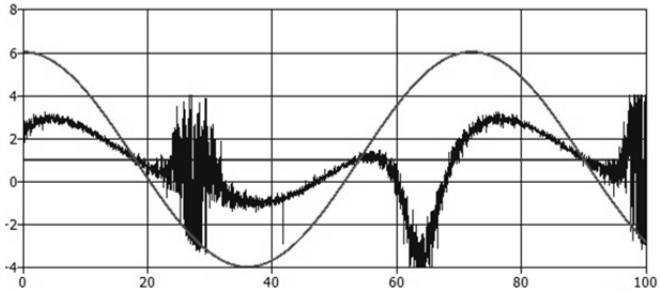

Рис. 3. Угловые измерения положения по оси Y

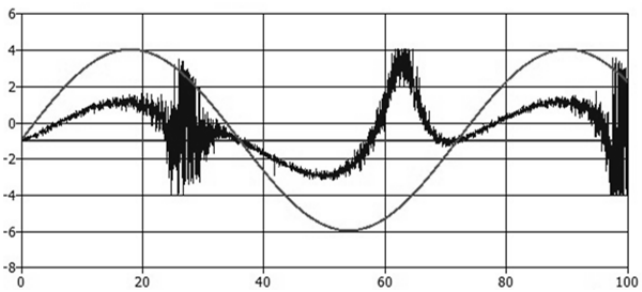

Рис. 4. Угловые измерения положения по оси Z

Из графиков следует, что угловые измерения источника полезного сигнала формируются с систематической ошибкой, зависящей от относительного положения источника помехи. Получаемое смещение формируемых измерений не всегда направлено в сторону помехи. В отдельных случаях антенна вместо источника полезного сигнала пеленгует источник помехи, что в замкнутом контуре обработки измерений могло бы вызвать «перепутывание» объектов, сопровождаемых аэродромной РЛС при маневрировании по площади аэродрома.

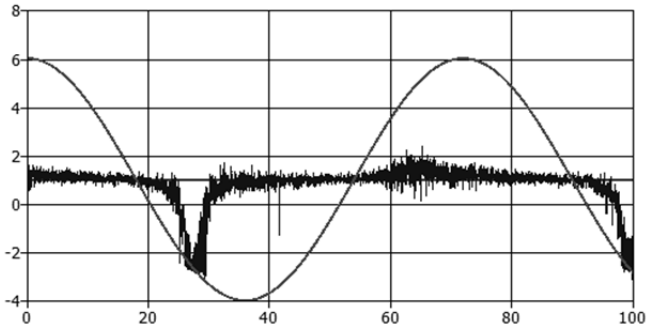

Рис. 5. Угловые измерения положения по оси Y

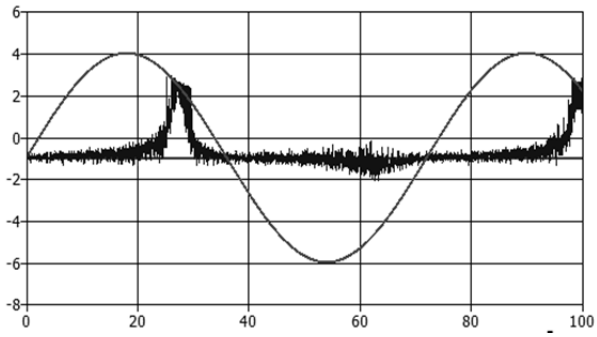

Рис. 6. Угловые измерения положения по оси Z

На рис. 5, 6 в тех же обозначениях приведены графики, построенные по результатам, полученным в процессе экспериментов с использованием модифицированного метода компенсации помех.

Сравнительный анализ полученных угловых измерений для двух рассматриваемых методов показывает, что модифицированный метод компенсации позволяет получить значительно более точные оценки. Однако при определенных взаимных расположениях источников полезного сигнала и помехи, формируемые угловые измерения указывают на источник помехи, что в замкнутом контуре сопровождения может вызвать сброс сопровождения источника полезного сигнала и перенацеливание на источник помехи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Угловые измерения при компенсации помех выполняются с систематической ошибкой, вызванной проникновением полезного сигнала в дополнительный канал антенны. Для ее уменьшения применяют различные модифицированные методы компенсации помех [1–3], один из которых рассмотрен в данной статье. Анализируемые методы позволяют в значительной мере исключить полезный сигнал из дополнительного канала антенны, что уменьшает возникающие ошибки угловых рассогласований.

Определить степень влияния возникающих ошибок на процесс радиолокационного сопровождения аналитически не всегда возможно, и в дальнейшем сравнение эффективности различных методов компенсации помех предполагается проводить с помощью математического моделирования замкнутого контура сопровождения РЛС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Папалекси Н.Д.** Радиопомехи и борьба с ними. М.: Л.: Гостехиздат, 1944.

2. **Леонов А.И., Фомичев К.И.** Моноимпульсная радиолокация. М.: Советское радио, 1970.

3. **Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М.** Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника, 2003.

APPLICATION OF COMPENSATION METHOD FOR SEPARATION USEFUL SIGNAL AND INTERFERENCE FROM NEARBY SOURCES

Ivanov S.A., Savin D.A.

Based on the comparative analysis of the known methods of noise suppression the ratios for the angular measurements are obtained. A mathematical model experiment to estimate the dependence of measurement error on the relative position of interference source and useful signal has been conducted. The modified method of interference compensation is tested experimentally. The analysis of obtained angular measurements for the considered methods shows that the modified method of compensation allows obtaining more precise estimates. The analyzed methods

allow considerably eliminating the useful signal from the antenna additional channel which reduces errors of angular misalignment.

To determine the degree of the radar error analytically is not always possible, and in future comparison of the effectiveness of various methods of interference compensation will be expected to conduct by means of mathematical modeling of radar closed contour.

Key words: suppression of interference, the useful signal, the compensation principle, channel angle measurements.

REFERENSES

1. Papaleksi N.D. Radio interference and control. Moscow, Leningrad, State Technical Publishing House, 1944. (In Russian)

2. Leonov A.I., Fomichov K.I. Monopulse radar. M.: Soviet radio, 1970. (In Russian)

3. Perunov Yu.M., Fomichov K.I., Yudin L.M. Jamming communication channels weapon control systems. M.: Radio Engineering, 2003. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Сергей Александрович, ведущий инженер ФГУП «ГосНИИ авиационных систем», электронный адрес: allerill@gmail.com.

Савин Дмитрий Алексеевич, аспирант НИУ ВШЭ, инженер 1-й категории ФГУП «ГосНИИ авиационных систем», электронный адрес: porosatina@gmail.com.