

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРОСС-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПОМЕХ НА МОНОИМПУЛЬСНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ С ФАЗОВОЙ ПЕЛЕНГАЦИЕЙ

Е. В. Калябин, А. А. Кравцов

*Рассмотрен принцип измерения угловых координат моноимпульсных радиолокационных станций с фазовой пеленгацией, представлена модель постановки кросс-поляризационной помехи и проанализирована методика измерения угла излучения электромагнитной волны различной поляризации. Показана эффективность кросс-поляризационных помех при защите летательных аппаратов в конфликтной радиолокации. Отдельно, посредством математического моделирования, рассмотрено ухудшение тактико-технических характеристик моноимпульсных радиолокационных станций с фазовой пеленгацией в условиях постановки кросс-поляризационных помех. Представлена возможность повышения эффективности станций активных имитационных помех. При достаточной мощности кросс-поляризационных помех снижают точность измерения угловых координат цели моноимпульсной радиолокационной станции до 40%.*

**Ключевые слова:** моноимпульсный радар с фазовой пеленгацией, антенна, кросс-поляризационные помехи, ложная цель, фазовые характеристики.

### Введение

Эхо-сигналы, принимаемые моноимпульсными радиолокационными станциями (РЛС), различаются по фазе из-за разницы траекторий, которые проходит электромагнитная волна (ЭМВ), отражённая от цели. Этот факт используется при постановке кросс-поляризационных помех для защиты летательных аппаратов. Помимо ответного сигнала от цели на антенны РЛС приходит и сигнал станции активных помех летательных аппаратов, поляризованный соответствующим образом. Несмотря на то, что моноимпульсные РЛС обладают высокой точностью определения угловых координат цели, хорошим быстродействием и достаточной способностью противостоять помехам, тем не менее существуют и успешно применяются алгоритмы, позволяющие нарушить работоспособность моноимпульсных РЛС вплоть до срыва сопровождения цели.

Станция постановки кросс-поляризационных помех использует сложную структуру диаграммы направленности моноимпульсной антенны для внесения ошибки в определение угловых координат по азимуту и углу места в РЛС с фазовой пеленгацией.

Моноимпульсные РЛС фазовой пеленгации используют по две идентичные, но разнесённые на некоторое расстояние антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях [1]. Вариант исполнения моноимпульсной антенны с фазовой пеленгацией, производства фирмы General Electric Company, представлен на рис. 1.

При значительном удалении от РЛС угловые координаты цели почти равны друг другу для соответствующих пар антенн, поэтому амплитуда принимаемых эхо-сигналов также одинакова. Когда цель находится на оси равносигнального направления РЛС, эхо-сигналы, принимаемые двумя лучами, идентичны по фазе с учетом сигнала нулевой раз-

ности. Когда цель отклоняется от оси равносигнального направления РЛС, эхо-сигналы, принимаемые двумя антеннами в одной плоскости, различаются по фазе из-за разницы в длине волны, так как две антенны находятся на определенном расстоянии. Образуется разность фаз, которая принимается за сигнал ошибки. Затем через сервопривод ориентация антенн восстанавливается таким образом, чтобы ось равносигнального направления отслеживала цель. Компенсация ошибки в определении угловых координат проходит одинаково для горизонтальной и вертикальной плоскостей соответственно. Моноимпульсные РЛС получили широкое распространение из-за высокой точности определения угловых координат и хорошего быстродействия. Они широко используются в системах управления огнем, станциях радиолокации, активных и полуактивных головках самонаведения ракет.

Методы моноимпульсного измерения угловых характеристик цели также широко используются в трехмерных РЛС и в фазированных антенных

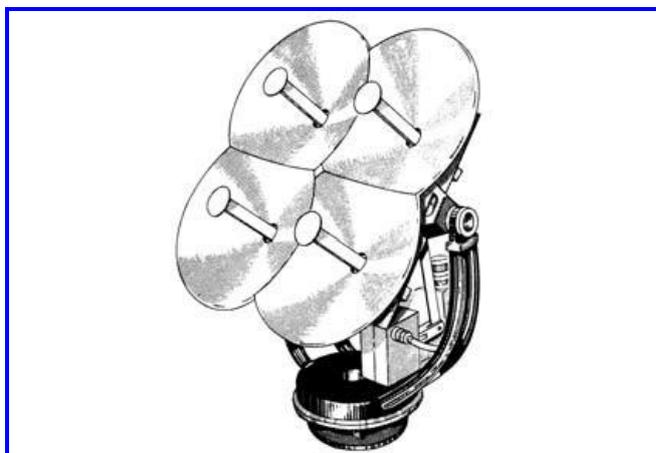


Рис. 1. Моноимпульсная антенна с фазовой пеленгацией фирмы General Electric Company

решетках. Однако успешной работе моноимпульсных РЛС могут помешать кросс-поляризационные помехи. Они могут внести нарушения в процесс измерения угловых координат и создать проблемы в радиолокации. В существующей литературе достаточно подробно анализировались и исследовались кросс-поляризационные помехи в моноимпульсных РЛС с амплитудной пеленгацией, но не анализировался эффект помех для моноимпульсных РЛС с фазовой пеленгацией.

Цель статьи заключается в том, чтобы показать эффективность кросс-поляризационных помех при защите летательного аппарата в конфликтной радиолокации. Представлен принцип измерения угловых координат моноимпульсных РЛС с фазовой пеленгацией, затем рассмотрена модель постановки и измерения характеристик кросс-поляризационной помехи. Кроме того, показано снижение эффективности измерения угловых координат моноимпульсными РЛС фазовой пеленгации при воздействии на них кросс-поляризационными помехами посредством математического моделирования.

**Алгоритм измерения угловых координат моноимпульсными радиолокационными станциями с фазовой пеленгацией**

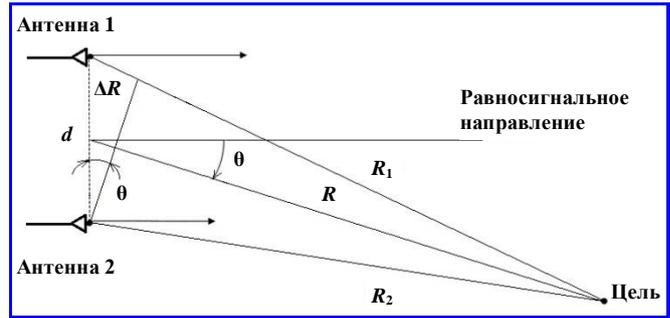
Моноимпульсные РЛС относятся к числу самых сложных радиолокационных систем. Из одного импульса моноимпульсная РЛС может получить все данные, необходимые для определения местоположения цели. Это удаётся сделать благодаря сравнению отражённых эхо-сигналов.

Моноимпульсные РЛС с фазовой пеленгацией работают по принципу фиксации изменения фазового угла отражённого от цели сигнала [2]. Направление на цель определяется по величине разности фаз принимаемых сигналов двух антенн. Если выходное напряжение ошибки от фазового компаратора преобразуется, усиливается и затем подаётся на сервосистему, то система управления антенной позволяет автоматически ориентировать РЛС на цель.

На рис. 2 показано, как происходит сравнение фаз в моноимпульсных РЛС с фазовой пеленгацией, которые имеют две антенны в одной плоскости, разнесённые на расстояние  $d$ .

Направление на цель и линия, перпендикулярная к линии, соединяющей антенны, в рассматриваемой плоскости образуют угол  $\theta$ . Расстояние  $R_1$  между целью и антенной 1 составляет:

$$R_1 = R + d/2\sin\theta.$$



**Рис. 2. Диаграмма направленности и сравнение сигналов в моноимпульсной радиолокационной станции с фазовой пеленгацией**

Расстояние  $R_2$  между целью и антенной 2 составляет:

$$R_2 = R - d/2\sin\theta.$$

Разность расстояний  $\Delta R$  от цели до антенн:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = d\sin\theta,$$

позволяет получить разность фаз  $\Delta\phi$ :

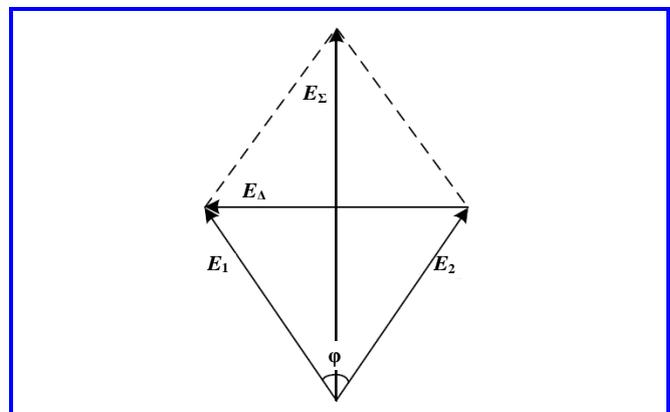
$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta,$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Когда угол  $\theta$  довольно мал, можно принять допущение, что  $\sin\theta \approx \theta$ , и приведенная выше формула может быть упрощена:

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} d\theta.$$

Следовательно, эхо-сигналы  $E$ , принимаемые двумя антеннами, представляют собой сигналы с одинаковой разностью фаз  $\phi$ . Векторная диаграмма суммарно-разностного сигнала представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Векторная диаграмма суммарно-разностного сигнала**

Суммарный сигнал  $E_{\Sigma}$  можно представить в виде выражения:

$$E_{\Sigma} = E_1 - E_2;$$

$$|E_{\Sigma}| = 2|E_1| \cos \frac{\varphi}{2}.$$

Разностный сигнал  $E_{\Delta}$  будет выглядеть следующим образом:

$$E_{\Delta} = E_1 - E_2;$$

$$|E_{\Delta}| = 2|E_1| \sin \frac{\varphi}{2}.$$

Значение модуля сигнала угловой ошибки определяется при нормализации амплитуды разностного сигнала по отношению к суммарному сигналу:

$$\frac{|E_{\Delta}|}{|E_{\Sigma}|} = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right);$$

$$\varphi_m = 2 \operatorname{Im} \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{|E_{\Delta}|}{|E_{\Sigma}|} \right) \right).$$

Угол отклонения цели может быть рассчитан следующим образом с помощью фазового детектора:

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{\pi d} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{|E_{\Delta}|}{|E_{\Sigma}|} \right) \right).$$

Когда цель наклонена к антенне 1, соотношение фаз сигнала такое, как показано на рис. 2; если цель наклонена к антенне 2, то направление вектора разностного сигнала противоположно тому, которое показано на рис. 3, и фаза разностного сигнала также противоположна, поэтому величина и фаза разностного сигнала отражают степень и направление соответственно отклонения цели от равносигнального направления. Как видно из рис. 3, суммарный и разностный сигналы имеют разность фаз  $90^\circ$ . Чтобы сравнивать фазы сигналов в фазовом детекторе, одна из них должна быть заранее сдвинута на  $90^\circ$ .

Структурная схема моноимпульсной РЛС с фазовой пеленгацией представлена на рис. 4.

Как показано на рис. 4, после того, как суммарный и разностный сигналы прошли смеситель и усилены с помощью генератора, разностный сигнал будет предварительно сдвинут по фазе на  $90^\circ$  и затем направлен в фазовый детектор [3]. Тогда выходное напряжение фазового детектора будет напряжением ошибки.

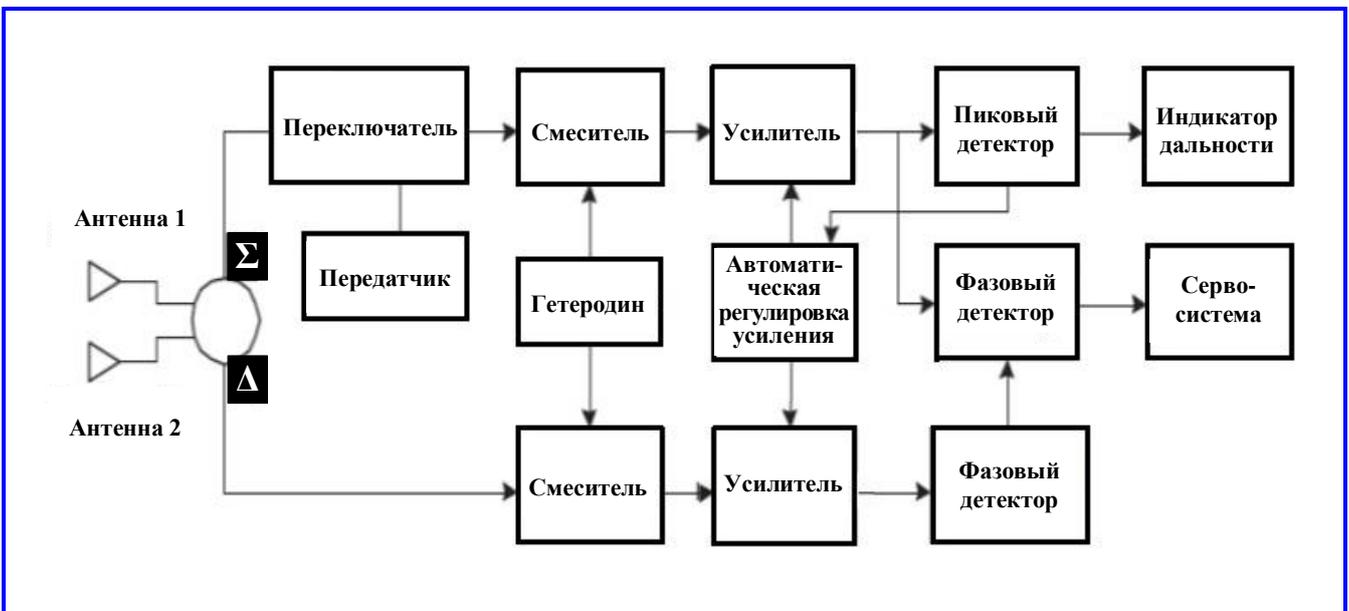


Рис. 4. Структурная схема моноимпульсной радиолокационной станции с фазовой пеленгацией

**Моделирование диаграммы кросс-поляризационной направленности на антеннах летательных аппаратов**

В диаграммах направленности антенн постановщика кросс-поляризационных помех будем рассматривать только измерение фазового угла по азимуту, так как угол места определяется аналогично и по определению суперпозиции эти плоскости не влияют на функционирование друг друга. Диаграммы направленности основной поляризации антенны 1 и антенны 2 определяются функцией  $\sin$  следующим образом [4]:

$$G_m = [\sin(k_m \theta) / (k_m \theta)]^2,$$

где  $k_m$  – количество боковых лепестков в интервале  $[0, \pi]$ ;  $\theta$  – угол азимута цели, рад.

На рис. 5 представлена диаграмма направленности антенн в плоскости основной поляризации.

Диаграммы направленности кросс-поляризации антенн моделируются с помощью вариационной функции первой производной  $\sin x/x$ :

$$G_c = L \frac{2k_c^2 \theta \sin(k_c \theta) \cos(k_c \theta) - 2k_c \sin^\alpha(k_c \theta)}{(k_c \theta)^\beta + 1},$$

где  $k_c$  – количество боковых лепестков в интервале  $[0, \pi]$ ;  $L$  – модуляция ослабления, которая может быть установлена по мере необходимости;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры формы ЭМВ.

На рис. 6 представлена диаграмма направленности антенн в плоскости кросс-поляризации.

Чтобы получить фазовые характеристики кросс-поляризационного сигнала помехи для двух антенн, необходимо установить параметры  $k_c$ ,  $L$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  для антенны 1 и антенны 2 соответственно.

**Модель для создания кросс-поляризационных помех**

В настоящее время не существует детальной математической модели для исследования фазовой диаграммы направленности кросс-поляризационной антенны, поэтому в данной работе используется набор фиксированных случайных чисел. Чтобы соответствовать реальной ситуации, этот случайный массив остается неизменным при имитационном анализе. Диаграммы направленности кросс-поляризационной антенны 1 и кросс-поляризационной антенны 2 равны  $P_{c1}(\theta)$  и  $P_{c2}(\theta)$  соответственно. Фазовые диаграммы основной поляризации можно считать согласованными и принять за постоянную величину

$P_m(\theta) = 0^\circ$ , то есть в эхо-сигналах основной поляризации, принимаемых двумя антеннами РЛС, нет разности фаз.

Если компоненты основной поляризации и кросс-поляризации эхо-сигналов равны  $s_m(t)$  и  $s_c(t)$  соответственно, то принятые напряжения можно выразить формулами:

$$E_{\Sigma m} = s_m(t)G_m(\theta) + s_m(t)G_m(\theta)\exp(j\Delta\varphi);$$

$$E_{\Delta m} = s_m(t)G_m(\theta)\exp(j\Delta\varphi) - s_m(t)G_m(\theta);$$

$$E_{\Sigma c} = s_c(t)G_{c1}(\theta)P_{c1}(\theta) + s_c(t)\exp(j\Delta\varphi)G_{c2}(\theta)P_{c2}(\theta);$$

$$E_{\Delta c} = s_c(t)\exp(j\Delta\varphi)G_{c2}(\theta)P_{c2}(\theta) + s_c(t)G_{c1}(\theta)P_{c1}(\theta),$$

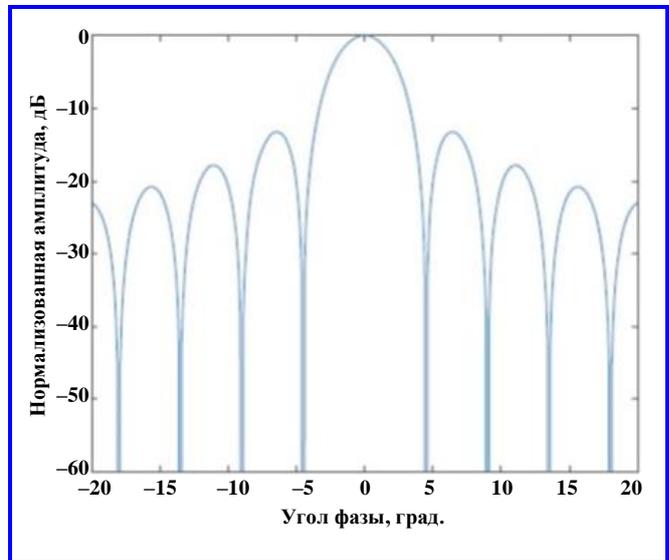


Рис. 5. Диаграмма направленности антенн в плоскости основной поляризации

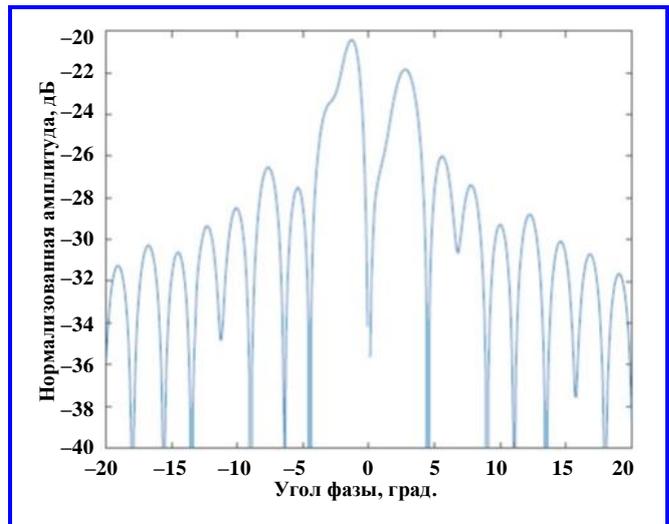


Рис. 6. Диаграмма направленности антенн в плоскости кросс-поляризации

где  $E_{\Sigma m}$  и  $E_{\Delta m}$  – суммарный и разностный сигналы основной поляризации соответственно;  $E_{\Sigma c}$  и  $E_{\Delta c}$  – суммарный и разностный сигналы кросс-поляризации соответственно.

Без кросс-поляризационных помех мы можем получить разность фаз двух приёмных антенн следующим образом:

$$\varphi_m = 2 \operatorname{Im} \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{|E_{\Delta m}|}{|E_{\Sigma m}|} \right) \right).$$

Согласно соотношению  $\varphi = 2\pi/\lambda d \sin\theta$  между фазой и углом отклонения можно получить угол отклонения цели  $\theta$  к оси антенны.

Однако, при наличии кросс-поляризационных помех [5] суммарный сигнал будет состоять из компоненты основной поляризации и компоненты кросс-поляризации, то есть  $E_{\Sigma} = E_{\Sigma m} + E_{\Sigma c}$ ; между тем разностный сигнал также включает компоненты основной поляризации и перекрестной поляризации, а именно  $E_{\Delta} = E_{\Delta m} + E_{\Delta c}$ . При наличии помех от кросс-поляризации разность фаз двух антенн будет изменена следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi &= 2 \operatorname{Im} \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{E_{\Delta}}{E_{\Sigma}} \right) \right) = 2 \operatorname{Im} \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{E_{\Delta m} + E_{\Delta c}}{E_{\Sigma m} + E_{\Sigma c}} \right) \right) = \\ &= 2 \operatorname{Im} \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{F_{\Delta m}(\theta)s_m(t) + F_{\Delta c}(\theta)s_c(t)}{F_{\Sigma m}(\theta)s_m(t) + F_{\Sigma c}(\theta)s_c(t)} \right) \right). \end{aligned}$$

Как правило, когда  $s_c(t) \ll s_m(t)$ , компонент кросс-поляризации намного меньше компонента основной поляризации, и компонентом перекрестной поляризации можно пренебречь, то есть  $E_{\Sigma} = E_{\Sigma m} + E_{\Sigma c} \approx E_{\Sigma m}$ ,  $E_{\Delta} = E_{\Delta m} + E_{\Delta c} \approx E_{\Delta m}$ . Но когда  $s_c(t)$  на 20 дБ больше, чем  $s_m(t)$  по величине, суммарно-разностные сигналы, вызванные кросс-поляризацией, нельзя игнорировать, и пеленгация будет соответственно отклоняться с вероятностью потери цели.

### Численное моделирование

Если  $s_m(t) = 1$ , то направления лучей обеих антенн 1 и 2 будут равны  $\theta_0 = 0^\circ$ , за критерий принимается среднеквадратичная ошибка измерения угловых координат  $\sqrt{E[(\theta - \theta_0)^2]}$  при моделировании и анализе отношений между угловой точностью и интенсивностью кросс-поляризационных помех и отношением сигнал/шум соответственно.

При моделировании отношение сигнал/шум устанавливается равным 30 дБ. Как видно из рис. 7 угловые характеристики радара в основном не из-

меняются, тогда как кросс-поляризационные помехи существенно ослабевают.

С увеличением интенсивности кросс-поляризационных помех угловая точность будет ухудшаться всё более серьезно. Когда интенсивность помех превышает 10 дБ, измерение угла становится неточным, а с увеличением интенсивности кросс-поляризационных помех среднеквадратичная погрешность измерения угловых координат будет постепенно увеличиваться. Более того, с увеличением мощности кросс-поляризационных помех сигналы помех, поступающие в приёмник через схему кросс-поляризации антенны, будут становиться все более интенсивными, поэтому компонента ошибки в формуле измерения угла будет становиться больше и, таким образом, вызывать ошибки измерения угловых координат.

При моделировании интенсивность кросс-поляризационных помех установлена равной 30 дБ. Как видно из рис. 8, точность измерения угловых координат относительно невелика с помехами или без них, отношение сигнал/шум остаётся небольшим, а погрешность измерения угла вместо этого меньше при наличии помех. Из-за наличия помех на угловую характеристику самого интерферометра будет оказываться значительное влияние, при этом точность измерения угла становится меньше, так как подвергается незначительному воздействию помех, а когда отношение сигнал/шум относительно невелико, составляющая кросс-поляризационной компоненты будет существенно весомой, что приводит к уменьшению угловой ошибки. Когда отношение сигнал/шум становится больше, угловая точность будет увеличиваться и, как правило, будет стабильной. Однако при наличии помех угловая погрешность будет относительно большой и не исчезнет с увеличением отношения сигнал/шум.

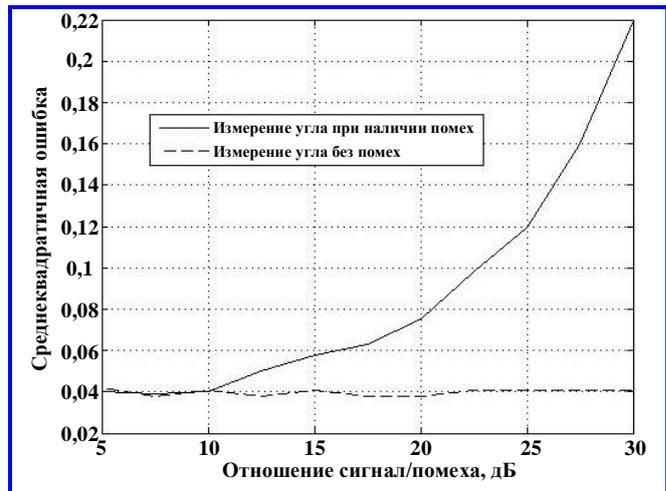


Рис. 7. Зависимость угловой точности от интенсивности кросс-поляризационных помех моноимпульсных радиолокационных станций

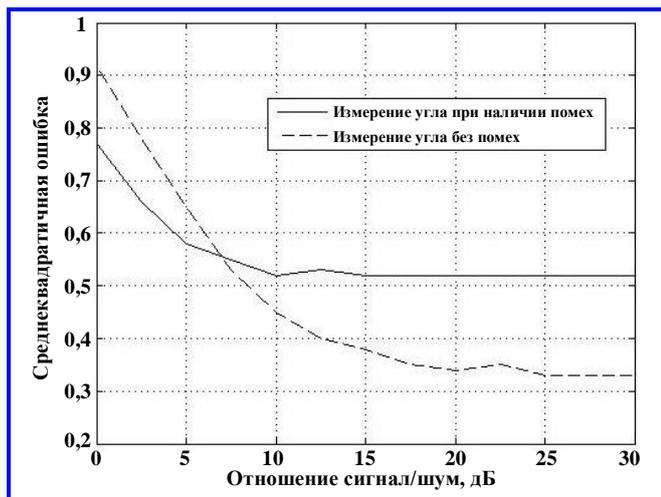


Рис. 8. Зависимость угловой точности от отношения сигнал/шум моноимпульсных радаров с фазовой пеленгацией

Кроме того, кросс-поляризационные помехи поступают в РЛС из диаграммы направленности антенны, что приводит к ошибкам амплитуды и фазы принимаемого сигнала, которые не могут быть устранены простым увеличением отношения сигнал/шум за счёт основной поляризации, поэтому измерение угловых координат станет неточным.

#### Заключение

Кросс-поляризация включает четыре режима поляризации радиолокационных систем:  $HH$ ,  $VV$ ,  $HV$  и  $VH$ . Поляризация основных каналов называется основной поляризацией ( $HH$ ,  $VV$ ), в то время как поляризация вторичного канала ( $HV$ ,  $VH$ ) определяется как кросс-поляризация. Как правило, кросс-поляризация требует, чтобы коэффициент

усиления излучения в основном направлении от кросс-поляризации был на 30 дБ меньше. В статье проанализировано влияние кросс-поляризационных помех на моноимпульсные РЛС с фазовой пеленгацией, приведены формулы и алгоритмы для вычисления суммарно-разностного измерения угловых координат. Фактические данные показывают, что алгоритм суммарно-разностного измерения угловых координат обладает хорошей точностью. Кросс-поляризационные помехи могут использовать неидеальные фазовые характеристики приёмных каналов РЛС для нарушения согласованности фазовых диаграмм направленности, что снижает угловые характеристики РЛС до 40%.

#### Литература

1. Bray M. G. Optimization of thinned Aperiodic Linear Phased Arrays Using Genetic Algorithms to Reduce Grating Lobes during Scanning / Matthew G. Bray, Douglas H. Werner // IEEE Trans on Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50. – No. 12. – P. 1732–1742.
2. Леонов А. И. Моноимпульсная радиолокация / А. И. Леонов, К. И. Фомичёв. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1984. – 312 с., ил.
3. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. – Москва : Вызовская книга, 2011. – 800 с., ил.
4. Dai H. Y. A new polarimetric method by using spatial polarization characteristics of scanning antenna / H. Y. Dai, X. S. Wang, Y. Z. Li // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60. – No.3. – P. 1653–1656.
5. Borgne M. A New Class of Adaptive Cross-Polarization Interference Cancellers for Digital Radio Systems [J] / M. Borgne // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2006. – Vol. 5. – No. 3. – P. 484–492.

Поступила в редакцию 09.02.2024

*Евгений Владимирович Калябин*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.  
*Андрей Андреевич Кравцов*, кандидат технических наук, профессор, старший научный сотрудник.  
 E-mail: post@cnirti.ru.  
 (АО «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга»).

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF CROSS-POLARIZATION JAMMING FOR MONOPULSE RADARS WITH PHASE DIRECTION FINDING

E. V. Kalyabin, A. A. Kravtsov

*In this article, the principle of measuring angular coordinates by monopulse radars with phase direction finding is considered, a model for setting cross-polarization interference is presented, and a method for measuring the EMF radiation angle of different polarization is analyzed. Separately, by means of mathematical modeling, the deterioration of the tactical and technical characteristics of monopulse radars with phase direction finding under conditions of cross-polarization interference is shown. The article shows the possibility of increasing the effi-*

ciency of active simulation interference stations. With sufficient power, cross-polarization interference reduces the accuracy of measuring the angular coordinates of the monopulse radar target by up to 40%.

**Keywords:** monopulse radar of phase direction finding, antenna, cross-polarization jamming, false target, phase characteristics.

### References

1. Bray M. G. Optimization of thinned Aperiodic Linear Phased Arrays Using Genetic Algorithms to Reduce Grating Lobes during Scanning / Matthew G. Bray, Douglas H. Werner // IEEE Trans on Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50. – No. 12. – P. 1732–1742.
2. Leonov A.I. Monopulse radiolocation – 2nd edition, revised and updated. – Moscow: Radio and communications, 1984. – 312 p. : with figures.
3. Kuprianov A.I. Radio electronic warfare. Foundations of the theory / A.I. Kuprianov, L.N. Shustov. - Moscow: University book, 2011. – 800 p., with figures.
4. Dai H. Y. A new polarimetric method by using spatial polarization characteristics of scanning antenna / H. Y. Dai, X. S. Wang, Y. Z. Li // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60. – No.3. – P. 1653–1656.
5. Borgne M. A New Class of Adaptive Cross-Polarization Interference Cancellers for Digital Radio Systems [J] / M. Borgne // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2006. – Vol. 5. – No. 3. – P. 484–492.

*Yevgeniy Vladimirovich Kalyabin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Research Scientist.  
Andrey Andreevich Kravtsov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Senior Research Scientist.*

*E-mail: post@cnirti.ru.*

*(JSC «Central Radio-Research Institute named after academician A. I. Berg»).*