<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>
УДК 623.465.72

Особенности работы активной ГСН при воздействии отражений от земной поверхности

М. А. Горбачев, В. В. Свистов, Е. А. Ульянова

Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация

На основе определения спектра помехового сигнала, отраженного от земной поверхности, рассмотрены особенности функционирования активной головки самонаведения (ГСН) при различных типах излучаемых сигналов. Даны рекомендации по использованию в активной ГСН результатов работ по обнаружению цели на фоне Земли радиолокаторами с синтезированной апертурой и моноимпульсной антенной.

Ключевые слова: спектр помехового сигнала, доплеровский сдвиг, диаграмма направленности антенны, удельная эффективная площадь рассеяния, активная головка самонаведения

Для цитирования: Горбачев М. А., Свистов В. В., Ульянова Е. А. Особенности работы активной ГСН при воздействии отражений от земной поверхности // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 25–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>

For citation: Gorbachev M. A., Svistov V. V., Ulyanova E. A. The specifics of functioning of the active homing head exposed to ground surface clutter // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 25–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>

Поступила 05.07.2021 Отрецензирована 13.08.2021 Одобрена 12.10.2021 Опубликована 27.12.2021

Описание помехового сигнала от земной поверхности

Радиолокационные отражения от земной поверхности характеризуются удельной эффективной площадью рассеяния σ_0 (ЭПР единицы земной поверхности) и площадью облучаемого участка S .

Спектр помехового сигнала от земной поверхности при работе активной ГСН (АГСН) по форме совпадает с квадратом диаграммы направленности ее антенны (ДНА) по мощности [1] и характеризуется доплеровским сдвигом частоты отраженного сигнала и величиной полосы. Доплеровский сдвиг зависит от скорости ракеты, угла между вектором скорости и направлением максимума ДНА, а полоса спектра зависит также от ширины главного луча ДНА. В ряде случаев спектр

помехового сигнала может иметь составляющие, связанные с отражениями от участка земной поверхности, находящегося под ракетой (альтиметровые отражения), уровень которых определяется уровнем боковых лепестков (фона) ДНА, а доплеровский сдвиг частоты – величиной проекции вектора скорости ракеты на направление альтиметрового участка.

Рассмотрим более подробно оценку спектра помехового сигнала с использованием типовой схемы сближения ракеты с целью, приведенной на рисунке 1.

При оценке воздействия помех от земной поверхности существенное значение имеет отстояние их спектра от доплеровского сдвига частоты полезного сигнала $f_{\text{дц}}$, определяемого по формуле

$$f_{\text{дц}} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma}{\lambda} + \frac{2V_{\text{р}} \cos \varphi}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучаемых колебаний, $V_{\text{р}}$, $V_{\text{ц}}$ – скорости ракеты и цели.

Рис. 1. Типовая схема сближения ракеты с целью. V_p , V_c – векторы скорости ракеты и цели, φ – угол между V_p и линией «ракета–цель», γ – угол между V_c и линией «ракета–цель», θ – ширина ДНА, ψ – угол между линией «ракета–цель» и земной поверхностью (угол скольжения)

Рис. 2. Схема формирования разности проекций вектора скорости на краях ДНА

Поскольку рассеивающие элементы при облучении земной поверхности в основном неподвижны, то доплеровский сдвиг центральной частоты спектра помехового сигнала $f_{дп}$ зависит от движения ракеты и направления центра ДНА, которое может не совпадать с направлением на цель,

$$f_{дп} = \frac{2V_p \cos(\varphi - \Delta\varphi)}{\lambda}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ – угол отклонения центра ДНА от линии «ракета–цель».

Полоса главного лепестка спектра помехового сигнала в основном определяется максимальной разностью проекций вектора скорости V_p на направления отстоящих друг от друга рассеивающих элементов, находящихся внутри или на краях главного луча ДНА, которая обусловлена неодинаковой величиной угла между вектором скорости V_p и направлениями на рассеивающие элементы земной поверхности.

Схема формирования максимальной разности проекций ΔV вектора скорости V_p

для типовой ситуации, когда $\Delta\varphi = 0$ и $\varphi > \theta/2$, приведена на рисунке 2.

С учетом малости угла $\theta/2$, разность ΔV на краях ДНА вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_p \left[\cos\left(\varphi - \frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\varphi + \frac{\theta}{2}\right) \right] = \\ &= 2V_p \sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} \approx V_p \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Разности проекций ΔV вектора скорости V_p соответствует разность доплеровских сдвигов частот Δf , определяющая полосу помехового сигнала,

$$\Delta f = \frac{2\Delta V}{\lambda} = \frac{2V_p \theta \sin \varphi}{\lambda}. \quad (4)$$

Принимая во внимание соотношение ширины ДНА, выраженное через λ и диаметр зеркала антенны d ,

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d}, \quad (5)$$

получим более простое выражение для полосы помехового сигнала в рассматриваемом случае

$$\Delta f = \frac{2V_p \sin \varphi}{d}. \quad (6)$$

При малых значениях угла φ , когда $\varphi < \theta/2$, ширина полосы уменьшается, но она не стремится к нулевому значению при $\varphi = 0$, когда разность проекций скорости V_p на краях ДНА становится равной 0.

Для случая $\varphi = 0$ максимальное значение разности проекций скорости V_p имеет место между рассеивающими элементами, находящимися в центре и на крае ДНА, т.е.

$$\Delta V = V_p - V_p \cos \frac{\theta}{2} = V_p \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \approx \approx V_p \left[1 - \left(1 - \frac{\theta^2}{8}\right)\right] = V_p \frac{\theta^2}{8}. \quad (7)$$

Соответственно, полоса помехового сигнала становится равной

$$\Delta f = \frac{2\Delta V}{\lambda} = \frac{V_p \theta^2}{4\lambda} = \frac{\lambda V_p}{4d^2}. \quad (8)$$

В качестве примера для оценки спектра помех примем типовые значения $V_p = 2000$ м/с, $d = 3 \times 10^{-1}$ м, $\lambda = 3 \times 10^{-2}$ м и $\theta = 0,1$ рад ($5,73^\circ$), тогда в зависимости от угла φ доплеровский сдвиг помехового сигнала $f_{дц}$, вычисленный по формуле (2) при $\Delta\varphi = 0$, и ширина полосы Δf , вычисленная по формуле (6) для случая $\varphi > \theta/2$ и (8) для случая $\varphi = 0$, будут иметь следующие значения (см. табл. 1).

При этом случаю $\varphi = 0$ соответствует наименьшая полоса помехового сигнала, но это может иметь место только при прямолинейном полете ракеты и нулевых значениях углов пеленга АГСН, что практически нереализуемо. Реальные значения угла φ при стрельбе по высокоскоростным целям могут достигать 60° и более, при этом полоса помехового сигнала возрастает одновременно со снижением уровня его спектральной плотности мощности.

При стрельбе по малоскоростным низколетящим целям при формировании оптимальных энергетически выгодных траекторий полета ракеты также имеет место увеличенное значение угла φ на момент поиска цели АГСН.

Рис. 3. Типовое изменение удельной ЭПР для см-диапазона
— суша; — море

Это позволяет при применении гребенки узкополосных фильтров, например с полосой, приемлемой для малоскоростной цели, как указано в [2], до 10 Гц, существенно улучшить условия для обнаружения цели на фоне помехи. Применение гребенки фильтров в условиях рассматриваемого примера (табл. 1) приведет при равномерном спектре помехи к снижению ее мощности в полосе каждого из 10 Гц фильтров на 13 дБ при $\varphi = 0$ и более 25 дБ при $\varphi > 15^\circ$.

Оценка мощности радиолокационных отражений производится на основе определения ЭПР облучаемого участка земной поверхности, которая характеризуется ее удельным значением σ_0 , зависящим от вида поверхности и угла скольжения ψ .

Типовое изменение удельной ЭПР для см-диапазона [2] приведено на рисунке 3.

Для поверхности при угле $\psi \approx 20^\circ$ значение $\sigma_0 \approx 10^{-2}$ (–20 дБ) и при уменьшении угла до $\psi = 7^\circ$ ее значение становится равным 10^{-3} (–30 дБ) с дальнейшим снижением при уменьшении угла ψ . Поэтому для исключения влияния помехового сигнала желательно формирование траектории ракеты на конечном участке полета ниже цели, что не всегда можно обеспечить.

Таблица 1

Параметры спектра помехового сигнала в зависимости от угла φ

φ , град	0	5	10	15	30	45	60	90
$f_{дц}$, кГц	133,3	132,8	131,3	128,8	115,5	94,3	66,7	0
Δf , кГц	0,2	1,2	2,3	3,4	6,7	9,4	11,5	13,3

Влияние помех в зависимости от типа сигналов

Отношение мощностей сигнала и помехи на входе приемника АГСН пропорционально отношению ЭПР цели $\sigma_{ц}$ и облучаемого участка земной поверхности $\sigma_{зп}$ и обратно пропорционально четвертой степени отношения дальностей до участка земной поверхности $R_{зп}$ и цели $R_{ц}$

$$\left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{вх} = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{зп}} \left(\frac{R_{зп}}{R_{ц}}\right)^4. \quad (9)$$

ЭПР участка равна $\sigma_{зп} = S \cdot \sigma_0$, где S – площадь участка, рассчитываемая в зависимости от типа зондирующего сигнала.

Для непрерывного сигнала облучаемый участок в пределах главного луча аппроксимируется четырехугольником с длиной AB и шириной $EF \approx PC \cdot \theta = H_p \theta / \sin \psi$ (рис. 4).

Длина AB вычисляется через высоту полета ракеты H_p по формуле

$$AB = OB - OA = \frac{H_p}{\operatorname{tg}\left(\psi - \frac{\theta}{2}\right)} - \frac{H_p}{\operatorname{tg}\left(\psi + \frac{\theta}{2}\right)} = \frac{H_p \sin \theta}{0,5(\cos \theta - \cos 2\psi)}. \quad (10)$$

Ввиду малости ширины ДНА запишем $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, тогда

$$AB \approx \frac{H_p \theta}{0,5(1 - \cos 2\psi)} = \frac{H_p \theta}{\sin^2 \psi}. \quad (11)$$

Площадь облучаемого участка в пределах главного луча приближенно равна

$$S_n \approx AB \cdot EF \approx \frac{H_p^2 \theta^2}{\sin^3 \psi}. \quad (12)$$

Рассчитаем для примера входное отношение сигнал/помеха для рассматриваемого случая при следующих условиях: $H_p = 20$ км, высота цели $H_{ц} = 5$ км, $\theta = 10^{-1}$ рад, $\psi = 30^\circ$, $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ (–17 дБ), $\sigma_{ц} = 20$ м².

При этих условиях $R_{зп}/R_{ц} = H_p/(H_p - H_{ц}) = 4/3$.

Поэтому отношение сигнал/помеха будет

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{вх} &= \frac{\sigma_{ц} \sin^3 \psi}{H_p^2 \theta^2 \sigma_0} \left(\frac{R_{зп}}{R_{ц}}\right)^4 = \\ &= \frac{20 \cdot 0,5^3}{(2 \cdot 10^4)^2 \cdot (10^{-1})^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^4 \approx \\ &\approx 10^{-4} \text{ (–40 дБ)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для обнаружения сигнала на фоне помехи и собственного шума приемника на выходе системы обработки обычно требуется выходное отношение сигнал/(помеха + шум) не менее 15 дБ. Поэтому в этих условиях коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки входных сигналов должен быть не менее 55 дБ.

Оценим возможность получения такого коэффициента. В дополнение к исходным данным, используемым при вычислении отношения (13), примем, что цель имеет скорость $V_{ц} = 200$ м/с, спектр сигнала цели $W_{ц}(f)$ имеет

Рис. 4. Пояснения к расчету площади облучаемого участка при непрерывном сигнале

полосу $\Delta f_{\text{ц}} = 10$ Гц, ДНА по мощности в суммарном канале как функция угла отклонения β при равномерном распределении поля в раскрыве задается формулой [3]

$$G(\beta) = \left(\frac{\sin\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin\beta\right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin\beta} \right)^2, \quad (14)$$

а углы φ и γ соответственно равны $\varphi = 15^\circ$ и $\gamma = 30^\circ$. Из таблицы 1 следует: $f_{\text{дп}} = 128,8$ кГц, $\Delta f = 3,4$ кГц. По формуле (1) находим $f_{\text{дц}} = 11,5 + f_{\text{дп}} = 11,5 + 128,8 = 140,3$ кГц.

Спектр помехи по форме совпадает с квадратом ДНА и задается формулой

$$W_{\text{п}}(f) = \left(\frac{\sin\left(\pi \frac{f}{\Delta f}\right)}{\pi \frac{f}{\Delta f}} \right)^4. \quad (15)$$

Ширина спектра помехи по нулевому уровню в главном луче равна $2\Delta f = 6,8$ кГц, а ширина каждого бокового лепестка равна $\Delta f = 3,4$ кГц. На рисунке 5 изображены спектры сигналов помехи и цели $W_{\text{ц}}(f)$. Спектр цели смещен по частоте относительно спектра помехи на 11,5 кГц, поэтому спектр цели попадает на третий правый боковой лепесток спектра помехи, который занимает область частот от $f_{\text{дп}} + 3\Delta f = f_{\text{дп}} + 10,2$ кГц до $f_{\text{дп}} + 4\Delta f = f_{\text{дп}} + 13,6$ кГц. Известно, что уровень третьего бокового лепестка ДНА $G(\beta)$ равен $-20,8$ дБ. Поскольку спектр помехи по форме равен квадрату ДНА, то уровень третьего бокового лепестка спектра помехи равен $-41,6$ дБ.

Система обработки сигнала в виде гребенки узкополосных фильтров с полосой каждого 10 Гц выделит сигнал цели и ослабит сигнал помехи, во-первых, на $10 \lg(\Delta f / \Delta f_{\text{ц}}) = 10 \lg(3400 / 10) = 25,3$ дБ, и, во-вторых, из-за разницы доплеровских частот сигналов помехи и цели уровень спектра помехи ослаблен на частоте цели не менее чем на 41,6 дБ. Поэтому система обработки улучшит отношение сигнал/помеха не менее чем на $25,3 + 41,6 = 66,9$ дБ, что превышает требуемый коэффициент улучшения 55 дБ. Система узкополосных доплеровских фильтров в условиях рассматриваемого примера обеспечит выделение сигнала цели на фоне отражений от земной поверхности, поскольку спектр цели

по частоте лежит вне главного лепестка спектра помехового сигнала.

При использовании квазинепрерывного импульсного (КНИ) сигнала с периодом повторения импульсов T и разрешающей способностью по дальности δ_R площадь облучаемого участка $S_{\text{кн}}$ в пределах главного луча рассчитывается как сумма площадей полосок длины $\delta_R / \cos \psi$ и ширины $EF \approx H_p \theta / \sin \psi$ каждая, заполняющих отрезок AB с шагом $cT / (2 \cos \psi)$ (c – скорость распространения радиоволн)

$$S_{\text{кн}} \approx \left(\frac{\delta_R}{\cos \psi} \right) \cdot EF \cdot \frac{AB}{cT / (2 \cos \psi)} = \frac{2\delta_R}{cT} S_{\text{н}}, \quad (16)$$

где $S_{\text{н}}$ – площадь облучаемого участка для непрерывного сигнала (12).

Выберем в условиях предыдущего примера следующие значения входящих параметров: $\delta_R = 150$ м, $T = 3,33 \cdot 10^{-6}$ с (300 кГц), $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, тогда облучаемая площадь при квазинепрерывном сигнале изменится в

$$\frac{2\delta_R}{cT} = \frac{2 \cdot 150}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,33 \cdot 10^{-6}} = 3,3 \cdot 10^{-1} \text{ раз} \quad (17)$$

по сравнению с непрерывным сигналом, а входное отношение сигнал/помеха будет

$$\left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}}} \right)_{\text{вх кн}} = \frac{1}{3,3 \cdot 10^{-1}} \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} (-35,2 \text{ дБ}). \quad (18)$$

В этом случае коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки должен быть не менее 50,2 дБ.

Таким образом, для квазинепрерывного сигнала несколько снижаются требования к системе обработки входных сигналов, и в случае, когда спектр цели расположен вне главного лепестка спектра помехи, обработка гребенкой узкополосных фильтров обеспечит выделение сигнала цели на фоне помехи от подстилающей поверхности.

Рис. 5. Спектры сигналов помехи и цели

Для сигнала с однозначной дальностью и разрешающей способностью по дальности δ_R следует рассматривать три случая.

Случай превышения дальности до цели $R_{ц}$ высоты ракеты ($R_{ц} > H_p$) приведен на рисунке 6.

Длина облучаемой площадки AB вычисляется по формуле

$$AB = OB - OA = \sqrt{\left(R_{ц} + \frac{\delta_R}{2}\right)^2 - H_p^2} - \sqrt{\left(R_{ц} - \frac{\delta_R}{2}\right)^2 - H_p^2} \approx R_{ц} \left(\sqrt{1 + \frac{\delta_R}{R_{ц}} - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2} - \sqrt{1 - \frac{\delta_R}{R_{ц}} - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2} \right) \approx \delta_R / \sqrt{1 - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2}. \quad (19)$$

Ширина облучаемого участка вычисляется, как и в случае непрерывного сигнала, по формуле $EF \approx H_p \theta / \sin \psi$.

Мощность сигнала помехи от участка следует рассчитывать с учетом квадрата коэффициента усиления антенны $G^2(\beta)$ в его направлении, где угол β между максимумом ДНА, направленным на цель, и линией, направленной в центр облучаемого участка, вычисляется по формуле

$$\beta = 90^\circ - \psi - \arccos\left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right). \quad (20)$$

В случае $R_{ц} < H_p$ элемент разрешения, в котором находится цель, не содержит земной поверхности, и мощность помехового сигнала $P_{п\text{ вх}} = 0$.

Рис. 6. Пояснения к расчету площади облучаемого участка при сигнале с однозначной дальностью

В случае $R_{ц} = H_p$ работа АГСН происходит при наличии альтиметровых отражений под прямым углом от участка земной поверхности площадью S ,

$$S = \pi \left(\sqrt{(H_p + \delta_R/2)^2 - H_p^2} \right)^2 \approx \pi H_p \delta_R. \quad (21)$$

Мощность сигнала помехи от альтиметрового участка следует рассчитывать с учетом квадрата коэффициента усиления антенны $G^2(\beta)$ в его направлении, где угол $\beta = 90^\circ - \psi$.

Рассчитаем входное отношение сигнал/помеха для наиболее типового случая $R_{ц} > H_p$ в условиях рассматриваемого примера при $H_p = 20$ км, $R_{ц} = 30$ км, $\delta_R = 150$ м, $\theta = 10^{-1}$ рад, $\psi = 30^\circ$, $\varphi = 15^\circ$, $\sigma_{ц} = 20$ м².

Угол $\beta = 90^\circ - 30^\circ - \arccos(20/30) = 11,8^\circ$ соответствует второму боковому лепестку ДНА, имеющему уровень $-17,8$ дБ. Поэтому примем квадрат коэффициента усиления по боковым лепесткам $G^2(\beta) = 3,2 \cdot 10^{-4}$ (-35 дБ).

Для угла скольжения $\angle PCO = 90^\circ - \psi - \beta = 90^\circ - 30^\circ - 11,8^\circ = 48,2^\circ$ (рис. 6), удельная ЭПР $\sigma_0 = 3,2 \cdot 10^{-2}$ (-15 дБ) (рис. 3).

Площадь облучаемого участка для сигнала с однозначной дальностью для этого случая равна

$$S_{од} = AB \cdot EF \approx \frac{\delta_R}{\sqrt{1 - (H_p/R_{ц})^2}} \cdot \frac{H_p \theta}{\sin \psi} = \frac{150 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 10^{-1}}{\sqrt{1 - (20/30)^2} \cdot 0,5} \approx 8 \cdot 10^5 \text{ м}^2. \quad (22)$$

Входное отношение сигнал/помеха будет

$$\left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{\text{вх од}} = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{эп}} = \frac{\sigma_{ц}}{G^2(\beta) S_{од} \sigma_0} = \frac{20}{3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} = 2,44 \text{ } (-3,9 \text{ дБ}). \quad (23)$$

В этом случае коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки должен быть не менее 11,1 дБ. Такой коэффициент улучшения обеспечит система обработки в виде гребенки узкополосных фильтров даже в случае, когда спектр помехи главным лепестком накрывает спектр цели, поскольку фильтрация дает выигрыш $10 \lg(\Delta f / \Delta f_{ц})$ в отношении сигнал/помеха, который в рассматриваемом примере составляет 25,3 дБ.

Особенности обнаружения цели

Обнаружение цели на фоне земной поверхности при целеуказании по углам в зоне ДНА можно проводить сигналами с однозначной дальностью или квазинепрерывными сигналами с селекцией цели по доплеровской частоте.

При обнаружении цели сигналом с однозначной дальностью можно использовать короткие импульсы с большой скважностью для уменьшения облучаемой площади. В этом случае, однако, будет затруднено обнаружение цели, особенно с малой ЭПР, при ее полете на малых высотах, что требует дополнительного введения доплеровской фильтрации.

Для обнаружения сигнала по скорости обычно используют квазинепрерывные импульсные последовательности с высокой частотой повторения F_{Π} , превышающей значение, соответствующее возможной максимальной скорости сближения ракеты с целью. При этом при малых скоростях цели с малой ЭПР часто невозможно обнаружение полезного сигнала с частотой доплеровского сдвига $f_{\text{дц}}$, перекрываемой главным лепестком спектра помех, создаваемых отражениями от Земли (рис. 7).

Интересный подход к обнаружению цели, спектр которой накрыт полосой помехи от земной поверхности, при использовании моноимпульсной антенны, т.е. антенны как с суммарной, так и с разностной ДНА, изложен в работах [1, 4] по применению радиолокаторов с синтезированной апертурой.

Как показано на рисунке 7, цель и помеха имеют различные доплеровские сдвиги частоты, хотя они находятся на одной линии

визирования. При совмещении же доплеровских частот они будут в различных угловых направлениях, что и полагается в основу предлагаемого в работе метода.

Определим на основе выражений (1) и (2) необходимую величину отклонения максимума ДНА от направления на цель $\Delta\varphi$, при котором $f_{\text{дп}}$ совпадет с $f_{\text{дц}}$,

$$\frac{2V_p \cos(\varphi - \Delta\varphi)}{\lambda} = \frac{2(V_p \cos \varphi + V_{\text{ц}} \cos \gamma)}{\lambda}. \quad (24)$$

Воспользовавшись соотношением $f(x_0 - \Delta x) \approx f(x_0) - f'(x_0)\Delta x$, представим $\cos(\varphi - \Delta\varphi)$ в виде

$$\begin{aligned} \cos(\varphi - \Delta\varphi) &\approx \cos \varphi - \Delta\varphi (-\sin \varphi) = \\ &= \cos \varphi + \Delta\varphi (\sin \varphi) \end{aligned} \quad (25)$$

после подстановки которого в (24) получим

$$V_p \cos \varphi + \Delta\varphi V_p \sin \varphi \approx V_p \cos \varphi + V_{\text{ц}} \cos \gamma. \quad (26)$$

Из (26) определяется значение необходимого углового отклонения $\Delta\varphi$, рад

$$\Delta\varphi \approx \frac{V_{\text{ц}} \cos \gamma}{V_p \sin \varphi}. \quad (27)$$

Значение $\Delta\varphi$ может быть вычислено на борту ракеты с использованием данных инерциальной системы и передаваемых по каналу радиокоррекции координат и составляющих скорости цели.

При реализации отклонения ДНА на требуемую величину $\Delta\varphi$ спектр помехового сигнала в разностном канале с доплеровским сдвигом $f_{\text{дп}}$, находящегося в одном фильтре с $f_{\text{дц}}$, будет повторять форму квадрата разностной ДНА по мощности, имея нулевую

Рис. 7. Спектры сигналов от цели и помех в суммарном канале

интенсивность на частоте $f_{\text{дп}}$, а интенсивность полезного сигнала будет соответствовать разностной ДНА в направлении на цель, смещенном относительно нуля на угол $\Delta\varphi$.

Указанное смещение, однако, не должно превышать половины ширины ДНА, что существенно ограничивает возможности применения этого метода. В соответствии с формулой (27) требуемое условие $\Delta\varphi < \theta/2$ выполнимо для малоскоростных целей при достаточно большом значении угла φ , что может быть обеспечено на начало поиска целей при формировании соответствующих траекторий полета ракеты.

Оценим возможность метода, применяющего моноимпульсную антенну, для обнаружения цели в наиболее сложном случае, когда используется непрерывный сигнал и спектр сигнала цели накрыт главным лепестком спектра помехи от подстилающей поверхности.

Пусть характеристики помехи, ДНА суммарного канала и значение полосы спектра сигнала цели такие же, как в примере с расчетом коэффициента улучшения для непрерывного сигнала.

Отметим, что для разностного канала при равномерном распределении поля в апертуре антенны нормированная ДНА по мощности имеет вид

$$G_{\Delta}(\beta) = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2 \left(\pi \frac{d}{2\lambda} \sin \beta \right)}{\pi \frac{d}{2\lambda} \sin \beta} \right)^2. \quad (28)$$

Рис. 8. Спектры сигналов цели и помехи в суммарном канале в случае: когда максимум ДНА направлен на цель (—) и когда он смещен на угол $\Delta\varphi$ (—)

Спектр помехи в разностном канале по форме совпадает с квадратом ДНА разностного канала и задается формулой

$$W_{\text{пд}}(f) = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2 \left(\pi \frac{f}{2\Delta f} \right)}{\pi \frac{f}{2\Delta f}} \right)^4. \quad (29)$$

При рассмотрении накрытия спектра цели спектром помехи предположим, что смещение по доплеровской частоте спектра сигнала цели относительно максимума спектра помехи равно 1 кГц. Тогда в соответствии с формулой (1) и данными таблицы 1 для $\varphi = 15^\circ$ получаем

$$f_{\text{дц}} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma}{\lambda} + \frac{2V_{\text{р}} \cos \varphi}{\lambda} = 1 + f_{\text{дп}} = 1 + 128,8 = 129,8 \text{ кГц.}$$

На рисунке 8 синим цветом изображены спектры сигналов цели и помехи в суммарном канале, выраженные в децибелах, для случая, когда максимум ДНА направлен на цель. На этом и последующих рисунках для удобства ось частот сдвинута на величину $f_{\text{дп}} = 128,8 \text{ кГц}$ так, чтобы в новых координатах этой частоте соответствовала нулевая частота.

Определим поправку $\Delta\varphi$, при которой обеспечивается сдвиг спектра помехи на 1 кГц путем смещения углового положения максимума ДНА суммарного канала и, соответственно, нуля ДНА разностного канала, на основе формулы (27)

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &\approx \frac{V_{\text{ц}} \cos \gamma}{V_{\text{р}} \sin \varphi} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma / \lambda}{2V_{\text{р}} \sin \varphi / \lambda} = \\ &= \frac{1000 [\text{Гц}]}{2 \cdot 2000 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \cdot \sin 15^\circ / (3 \cdot 10^{-2} [\text{м}])} = (30) \\ &= 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ рад } (1,66^\circ). \end{aligned}$$

При таком угловом смещении ДНА ($\Delta\varphi = 1,66^\circ$) цель будет находиться уже не в максимуме ДНА суммарного канала и мощность сигнала от цели уменьшится на величину

$$\begin{aligned} 10 \lg G^2(\Delta\varphi) &= 10 \lg \left(\frac{\sin \left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \Delta\varphi \right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \Delta\varphi} \right)^4 = \\ &= 40 \lg \frac{\sin \left(\pi \frac{30}{3} \sin 1,66^\circ \right)}{\pi \frac{30}{3} \sin 1,66^\circ} = -2,47 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

При этом спектр помехового сигнала сдвинется по частоте и его максимум будет на доплеровской частоте сигнала цели – график на рисунке 8, изображенный красным цветом.

На рисунке 9 изображены спектры сигналов цели и помехи в разностном канале для случая, когда нуль разностной ДНА смещен относительно направления на цель на угол $\Delta\varphi$.

Как видно из рисунка 9, спектр помехи в разностном канале обращается в нуль на доплеровской частоте цели. При рассмотрении прохождения помехи через узкополосный фильтр с полосой $\Delta f_\phi = 10$ Гц, настроенный на частоту цели, отметим, что максимальное значение спектра помехи в разностном канале будет на краях фильтра

$$W_{\text{нД}}\left(\frac{\Delta f_\phi}{2}\right) = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{\Delta f_\phi}{4\Delta f}\right)}{\pi \frac{\Delta f_\phi}{4\Delta f}}\right)^4 = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{10}{4 \cdot 3400}\right)}{\pi \frac{10}{4 \cdot 3400}}\right)^4 = 1,03 \cdot 10^{-10}, (-99,9 \text{ дБ}). \quad (31)$$

Уровень сигнала цели в разностном канале будет ослаблен на величину

$$10\lg G_{\Delta}^2(\Delta\varphi) = 10\lg\left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{d}{2\lambda} \sin\Delta\varphi\right)}{\pi \frac{d}{2\lambda} \sin\Delta\varphi}\right)^4 = 40\lg\left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{30}{6} \sin 1,66^\circ\right)}{\pi \frac{30}{6} \sin 1,66^\circ}\right) = -9,3 \text{ дБ}.$$

Поскольку ширина ДНА в разностном канале приблизительно в два раза больше, чем в суммарном, то входная мощность помехи в разностном канале будет на 3 дБ больше и полоса помехи в разностном канале будет в два раза больше и составит $2\Delta f = 6,8$ кГц. С учетом ослабления сигнала цели в разностном канале на 9,3 дБ отношение сигнал/помеха, рассчитанное по формуле (13) для суммарного канала в случае непрерывного сигнала, уменьшится в разностном канале на $3 + 9,3 = 12,3$ дБ. Входное отношение сигнал/помеха в разностном канале составит $-40 - 12,3 = -52,3$ дБ, и требуемый коэффициент улучшения

отношения сигнал/помеха должен быть не менее $52,3 + 15 = 67,3$ дБ.

Обработка гребенкой узкополосных фильтров улучшит отношение сигнал/помеха на

$$10\lg\left(\frac{2\Delta f}{\Delta f_{\text{ц}}}\right) = 10\lg\left(\frac{6800}{10}\right) = 28,3 \text{ дБ},$$

и с учетом формы спектра помехи в разностном канале на частоте цели с уровнем $-99,9$ дБ коэффициент улучшения теоретически составит $28,3 + 99,9 = 128,2$ дБ, что значительно превышает требуемый коэффициент для крупноразмерной цели.

Таким образом, за счет более сильного подавления помехового сигнала по сравнению с ослаблением полезного сигнала система обработки в виде гребенки узкополосных фильтров в разностном канале со смещением ДНА на $\Delta\varphi$ позволяет обеспечить обнаружение сигнала цели на фоне подстилающей поверхности и при накрытии в суммарном канале спектра цели спектром помехи.

Заключение

Проведена оценка спектра помехового сигнала от земной поверхности.

Рассмотрено влияние помеховых сигналов от земной поверхности на отношение сигнал/помеха для непрерывных и квазипрерывных сигналов, а также сигналов с односторонней дальностью.

Рис. 9. Спектры сигналов цели и помехи в разностном канале, когда нуль разностной ДНА смещен от направления на цель на угол $\Delta\varphi$

Показана целесообразность рассмотрения для АГСН режима работы со смещением направления ее антенны для обнаружения цели с использованием разностной ДНА.

Дано определение величины необходимого углового отклонения моноимпульсной антенны для обеспечения работы АГСН в условиях накрытия принимаемого полезного сигнала спектром помехи от Земли.

Показано, что для типовых характеристик крупноразмерной цели и помех от земной поверхности в случае сигнала с однозначной дальностью возможно обнаружение цели приемником АГСН в суммарном канале с системой узкополосных доплеровских фильтров. Для непрерывных и квазинепрерывных сигналов обнаружение цели возможно в суммарном канале в случае, когда спектр цели лежит вне главного лепестка спектра помехи.

В случае, когда спектр цели по частоте лежит внутри главного лепестка спектра помехи, обнаружение цели также возможно, но с использованием смещения разностной ДНА.

Список литературы

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Cherwek R. A. Coherent active seeker guidance concepts for tactical missiles // IEEE Eascon'78 Record. 1978. No 25 –27. Sept. P. 199 –202.
3. Справочник по радиолокации. Т. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. М. Сколника. М.: Советское радио, 1977. 408 с.
4. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В. Т. Горянова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

Об авторах

Горбачев Михаил Алексеевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: система управления, самонаведение.

Свистов Владимир Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокация, обработка сигналов.

Ульянова Екатерина Александровна – ведущий инженер Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: система управления, моделирование и программирование.

The specifics of functioning of the active homing head exposed to ground surface clutter

Gorbachev M. A., Svistov V. V., Ulyanova E. A.

NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation

Based on the determined ground surface clutter spectrum, we analyse the specific features of functioning of the active homing head (AHH) in relation to different types of radiated signals. With respect to AHH functioning, the paper gives recommendations for use of target data acquired against the Earth's background by monopulse synthetic aperture radars.

Keywords: interference signal spectrum, Doppler shift, antenna radiation pattern, specific radar cross-section, active homing head

Information about the authors

Gorbachev Mikhail Alekseyevich – Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: control system, homing.

Svistov Vladimir Viktorovich – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radiolocation, signal processing.

Ulyanova Ekaterina Aleksandrovna – Lead Engineer, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: control system, modelling and programming.