

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ И ЧАСТОТНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ КОГЕРЕНТНОГО ГЕТЕРОДИНА НА КАЧЕСТВО КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ЭХО-СИГНАЛОВ

д.т.н., проф. В.П. Деденок, к.т.н. В.Р. Хачатуров, А.С. Петренко

Проводится анализ влияния неустойчивости начальной фазы и частоты когерентного гетеродина в РЛС с эквивалентной внутренней когерентностью на качество когерентного накопления эхо-сигналов.

Постановка проблемы. В большинстве существующих в настоящее время обзорных радиолокационных станций реализовано некогерентное накопление, т.е. накопление после детектирования.

Для обеспечения когерентного накопления необходимо либо реализовать когерентный передатчик (истинная внутренняя когерентность), либо при использовании передатчика со случайной начальной фазой зондирующего сигнала организовать эквивалентную внутреннюю когерентность. В качестве источника опорного напряжения обычно используют так называемый когерентный гетеродин [1], работающий на промежуточной частоте. Он запоминает фазу зондирующего сигнала от импульса к импульсу, осуществляя тем самым эквивалентную когерентность.

Получение опорного напряжения с помощью фазирования при эквивалентной внутренней когерентности требует высокой стабилизации частоты колебаний когерентного гетеродина. Однако возможно несоответствие фазы и частоты колебаний когерентного гетеродина и генератора передатчика из-за ошибок навязывания их гетеродину.

Анализ последних достижений и публикаций. Причины ухода частоты и начальной фазы когерентного гетеродина относительно генератора передатчика РЛС с эквивалентной внутренней когерентностью достаточно полно рассмотрены в работах [1, 3]. В [4] приведена зависимость нормированного коэффициента учета аппаратурных искажений в системах когерентного приема от относительных значений неустойчивости несущей частоты. В [1] обоснована необходимость предъявления соответствующих требований к стабильности работы узлов когерентно-импульсных РЛС (в частности когерентного гетеродина и схемы фазирования) с целью оптимизации эффективности его работы. В [3] рас-

смотрен учет влияния нестабильностей (частоты, фазы и др.) оборудования когерентно-импульсных РЛС на качество обнаружения неподвижных целей в условиях пассивных помех.

Формулировка целей статьи. Целью статьи является анализ потерь на “некогерентность” в схеме когерентного накопления пачки радиоимпульсов в РЛС с эквивалентной внутренней когерентностью в случае наличия фазовых и частотных нестабильностей когерентного гетеродина (**КГ**), возникающих, как правило, из-за неточного фазирования **КГ**.

Изложение основного материала. Проведен анализ требований к точности навязывания фазы и частоты когерентному гетеродину. Если все параметры ожидаемого сигнала известны и учитываются в опорном весовом векторе, то обеспечивается когерентное накопление пачки радиоимпульсов. При этом результирующей параметр обнаружения q^2 равен сумме отношений сигнал-шум в каждом импульсе пачки q_i^2 . В случае, когда начальные фазы опорного сигнала в i -м импульсе (ψ_{0i}) и принятого отраженного сигнала в i -м периоде зондирования (ψ_{1i}) не совпадают и $\psi_{1i} - \psi_{0i} = \Delta\psi$, где $\Delta\psi$ – рассогласование начальных фаз отраженного и опорного сигналов из-за неточности фазирования когерентного гетеродина (следствием чего является неполное знание параметров (начальной фазы) отраженного сигнала) параметр обнаружения q^2 становится функцией случайного вектора $\Delta\Psi$, для которого

$$\Delta\Psi^T = \|\Delta\Psi_1 \ \Delta\Psi_2 \ \dots \ \Delta\Psi_i \ \dots \ \Delta\Psi_M\|. \quad (1)$$

С учетом принятых допущений $q^2(\Delta\Psi)$ может быть определен как:

$$\begin{aligned} q^2(\Delta\Psi) &= \sum_{i=1}^M \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}_{1i}(t) \cdot \dot{X}_{0i}^*(t) dt = \frac{2}{N_0} \sum_{i=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} b_i^2 a_0^2(t-t_i) e^{j\psi_{1i}} e^{-j\psi_{0i}} = \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} b_i^2 a_0^2(t-t_i) dt \cdot e^{j\Delta\psi_i} = \sum_{i=1}^M \frac{2}{N_0} b_i^2 E_0 e^{j\Delta\psi_i} = \sum_{i=1}^M q_0^2 b_i^2 e^{j\Delta\psi_i} = \\ &= q_0^2 \sum_{i=1}^M b_i^2 e^{j\Delta\psi_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{X}_i(t)$ – комплексная амплитуда i -го импульса пачки; $q_0^2 = 2E_0/N_0$; $a_0 = \begin{cases} a_0, & 0 \leq t \leq \tau_{и}; \\ 0, & \text{востальных случаях.} \end{cases}$; $b_i = F(t_i)$, $F(t)$ – функция огибающей пачки.

Пусть случайный вектор фазовых рассогласований $\Delta\Psi$ имеет гауссов закон распределения с независимыми от импульса к импульсу рассогласованиями и с нулевым математическим ожиданием. Плотность веро-

ятности вектора $\Delta\Psi$ можно записать как

$$p(\Delta\Psi) = 1 / \prod_{i=1}^M \sqrt{2\pi\sigma_{\Psi_i}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \Delta\Psi_i^2 / \sigma_{\Psi_i}^2 \right\}. \quad (3)$$

Можно определить среднее значение $q^2(\Delta\Psi)$:

$$\begin{aligned} q_{\text{ср}}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} q^2(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi = q_0^2 \sum_{i=1}^M b_i^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Delta\Psi_i} p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi = \\ &= q_0^2 \sum_{i=1}^M b_i^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Delta\Psi_i} p(\Delta\Psi_i) d\Delta\Psi_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим отдельно интеграл (с учетом допущения о нормальном законе распределения ошибок фазирования когерентного гетеродина):

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Delta\Psi_i} p(\Delta\Psi_i) d\Delta\Psi_i = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Delta\Psi_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Psi_i}}} e^{-\frac{1}{2} \frac{\Delta\Psi_i^2}{\sigma_{\Psi_i}^2}} d\Delta\Psi_i = e^{-\frac{\sigma_{\Psi_i}^2}{2}}. \quad (5)$$

С учетом этого получим:

$$q_{\text{ср}}^2 = \sum_{i=1}^M b_i^2 \cdot q_0^2 \cdot e^{-\frac{\sigma_{\Psi_i}^2}{2}} = \sum_{i=1}^M q_i^2 e^{-\frac{\sigma_{\Psi_i}^2}{2}}. \quad (6)$$

Если принять допущение $\sigma_{\Psi_i}^2 = \sigma_{\Psi}^2$, то для пачки произвольного вида

$$q_{\text{ср}}^2 = e^{-\frac{\sigma_{\Psi}^2}{2}} \sum_{i=1}^M q_i^2. \quad (7)$$

По последнему соотношению построен график, показывающий зависимость среднего значения параметра обнаружения $q_{\text{ср}}^2$ от средне-квadrатической ошибки фазирования когерентного гетеродина (рис. 1).

В случае, когда существуют рассогласования частот отраженного и опорного сигналов $\Delta\omega$ можно перейти от частоты к фазе

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_0 + \Delta\omega. \quad (8)$$

В момент времени t_0

$$\omega_0 \cdot (t_0 + \tau) = \psi(t_0 + \tau), \quad (9)$$

положим $t_0 = 0$, тогда получим

$$\omega_{\text{кр}} \cdot (t_0 + \tau) = \omega_0 \cdot \tau + \Delta\omega \tau = \psi(\tau) + \Delta\psi(\tau), \quad (10)$$

где $\Delta\psi(\tau)$ – фазовая расстройка, зависящая от τ – времени запаздывания отраженного сигнала, а, следовательно, от дальности до объекта.

Теперь рассуждая аналогично случаю нестабильности начальной

фазы и, принимая те же допущения в отношении случайного вектора фазовых расстройк, можно найти среднее значение параметра обнаружения как функции случайного вектора фазовых расстройк:

$$q_{\text{ср}}^2 = \sum_{i=1}^M q_i^2 e^{-\sigma_{\omega_i}^2 / 2 \cdot \tau^2} . \quad (11)$$

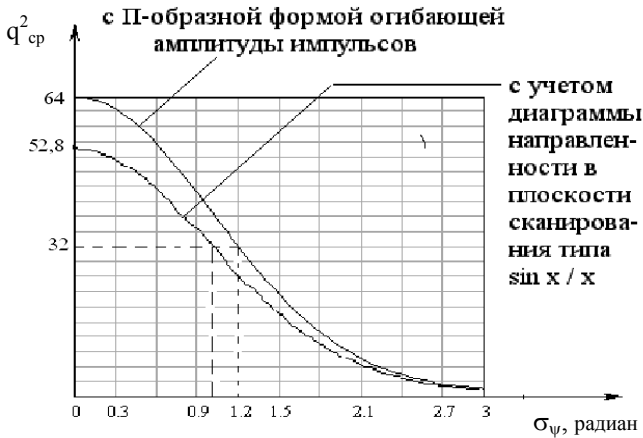


Рис. 1. Зависимость среднего значения параметра обнаружения $q_{\text{ср}}^2$ от среднеквадратической ошибки фазирования когерентного гетеродина

Как и ранее, положив $\sigma_{\psi_i}^2 = \sigma_{\psi}^2$ для пачки произвольного вида, получим:

$$q_{\text{ср}}^2 = e^{-\frac{\sigma_{\psi}^2}{2} \tau^2} \sum_{i=1}^M q_i^2 . \quad (12)$$

По этому соотношению построены графики зависимости параметра обнаружения от среднеквадратической ошибки частоты при фиксированной дальности до объекта (рис. 2) и графики зависимости параметра обнаружения от дальности при фиксированной среднеквадратической ошибке частоты (рис. 3). Рассмотрим отдельно вопрос о средних относительных потерях η в качестве накопления:

$$\eta = q_{\text{ср}}^2 \text{ потери} / q_{\text{ср}}^2 \text{ без потерь} . \quad (13)$$

Анализ показал, что в случае фазовых расстройк для пачки произвольного вида выражение для η имеет вид:

$$\eta = e^{-\frac{\sigma_{\psi}^2}{2}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^M q_i^2}{\sum_{i=1}^M q_i^2} = e^{-\frac{\sigma_{\psi}^2}{2}} . \quad (14)$$

По этому соотношению построен график (рис. 4).

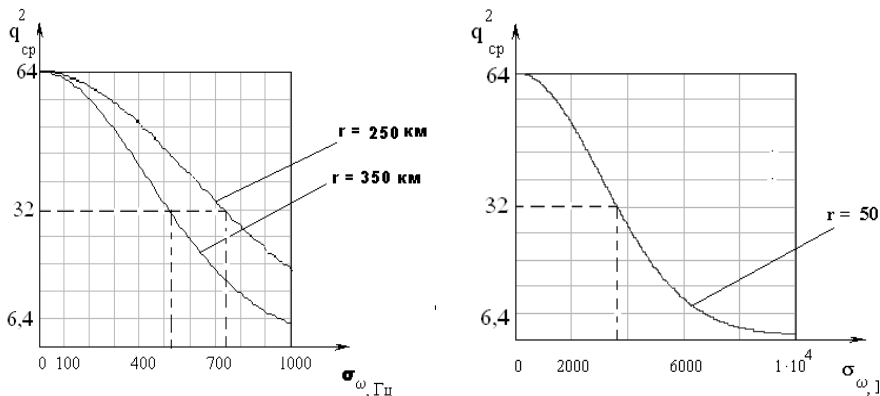


Рис. 2. Зависимость параметра обнаружения от среднеквадратической ошибки частоты при фиксированной дальности до объекта

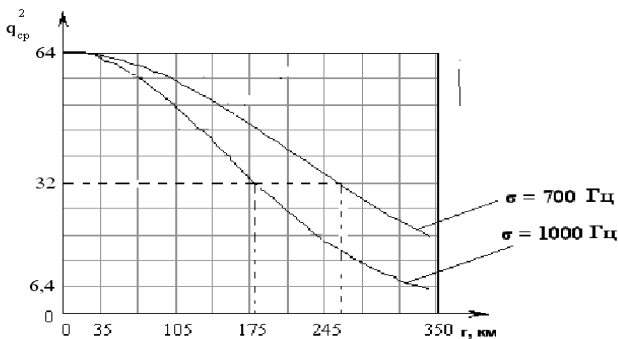


Рис. 3. Зависимость параметра обнаружения от дальности при фиксированной среднеквадратической ошибке частоты

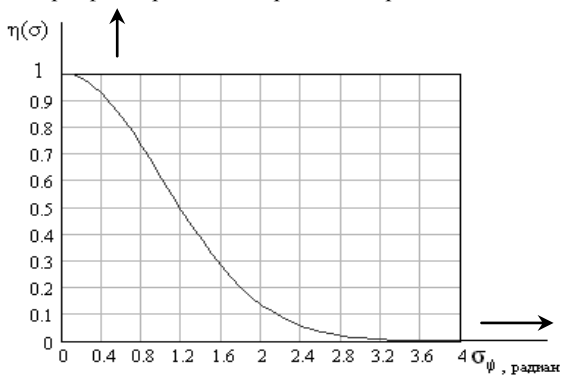


Рис. 4. Зависимость потерь в качестве накопления

от фазовых ошибок

В случае частотных расстройк для пачки произвольного вида

$$\eta = e^{-\frac{\sigma_{\omega}^2}{2} \cdot \tau^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^M q_i^2}{\sum_{i=1}^M q_i^2} = e^{-\frac{\sigma_{\omega}^2}{2} \cdot \tau^2} \quad (15)$$

Анализ зависимости относительных потерь в качестве накопления, обусловленных частотными нестабильностями когерентного гетеродина, также представлен на графике (рис. 5, а, б).

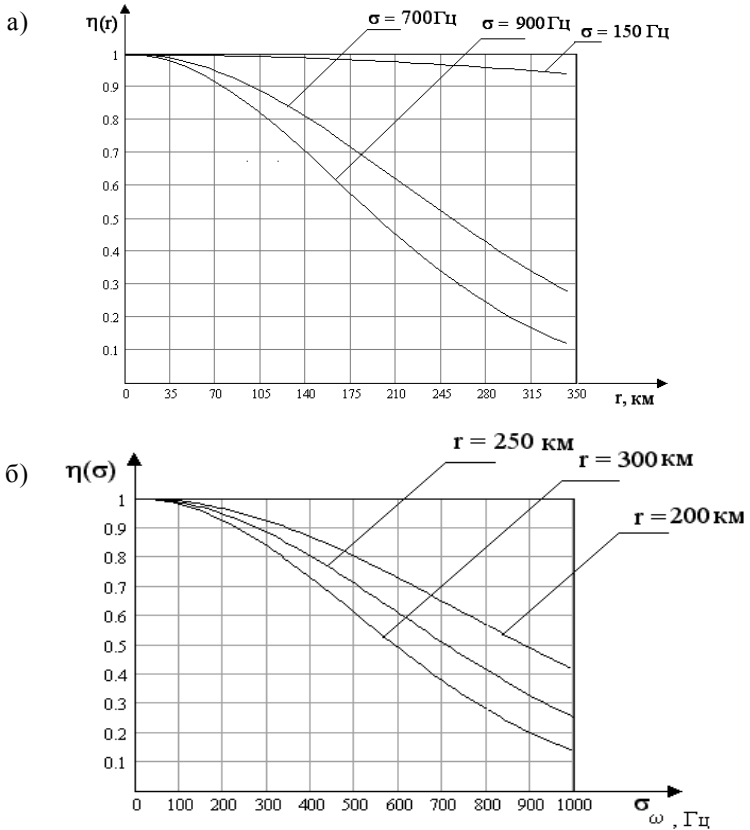


Рис. 5. Зависимость потерь в качестве накопления от: а) среднеквадратической ошибки частоты при фиксированной дальности до объекта; б) дальности до объекта при фиксированной среднеквадратической ошибке частоты

Таким образом, средние относительные потери ни в случае фазовых, ни в случае частотных расстройк не зависят ни от формы огибаю-

щей пачки, ни от количества импульсов в пачке, а зависят только от σ_{Ψ}^2 и $\sigma_{\omega}^2 \cdot \tau^2$.

Рассмотрим более общий случай, когда помеха – небелый шум, а сигнал тот же с полностью известными параметрами. При наличии расстройек начальной фазы ожидаемого и принимаемого сигналов параметр обнаружения также становится функцией случайного вектора фазовых расстроек $\Delta\Psi$.

Как и ранее запишем выражение для математического ожидания параметра обнаружения $q^2(\Delta\Psi)$:

$$\begin{aligned} q_{\text{ср}}^2(\Delta\Psi) &= \int_{-\infty}^{\infty} q^2(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{X}}^T \dot{\Phi}^{*-1} \dot{\mathbf{X}}^*(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi = \\ &= \dot{\mathbf{X}}^T \dot{\Phi}^{*-1} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{X}}^*(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\dot{\Phi}$ – комплексная корреляционная матрица помехи.

Согласно [2] интегралом от матрицы по переменной называется матрица, состоящая из интегралов от элементов матрицы по переменной, расположенных в том же порядке, что и сами элементы. Принимая, как и ранее, допущение о том, что случайный вектор фазовых расстроек имеет нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием, расстройки начальной фазы неизвестны, случайны и разные от импульса к импульсу, рассмотрим отдельно интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{X}}^*(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi$$

и приняв, как и ранее, $\sigma_{\Psi_1}^2 = \sigma_{\Psi}^2$, можно записать:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{X}}^*(\Delta\Psi) p(\Delta\Psi) d\Delta\Psi = \dot{\mathbf{X}}^* \cdot e^{-\frac{\sigma_{\Psi}^2}{2}}. \quad (17)$$

Следовательно, окончательное выражение для параметра обнаружения в случае, когда помеха небелый шум имеет вид

$$q_{\text{ср}}^2(\Delta\Psi) = \dot{\mathbf{X}}^T \dot{\Phi}^{*-1} \dot{\mathbf{X}}^* e^{-\frac{\sigma_{\Psi}^2}{2}}. \quad (18)$$

Теперь запишем выражение для относительных потерь в качестве накопления эхо-сигналов при наличии рассогласования начальной фазы опорного и принимаемого сигналов из-за неточности фазирования когерентного гетеродина (потерь на “некогерентность”):

$$\eta = \frac{q_{\text{ср с потерями}}^2}{q_{\text{ср без потерь}}^2} = \frac{\dot{\mathbf{X}}^T \dot{\Phi}^{*-1} \dot{\mathbf{X}}^* e^{-\frac{\sigma_{\Psi}^2}{2}}}{\dot{\mathbf{X}}^T \dot{\Phi}^{*-1} \dot{\mathbf{X}}^*} = e^{-\frac{\sigma_{\Psi}^2}{2}}. \quad (19)$$

Выражение (19) в точности повторяет выражение (14)

Нетрудно убедиться, что для случая частотных ошибок мы придем к выражению (15).

Выводы. 1. Средние относительные потери ни в случае фазовых, ни в случае частотных расстройек не зависят ни от формы огибающей пачки, ни от количества импульсов в пачке, ни от вида помехи (ее наличия или отсутствия), а зависят только от σ_{ω}^2 и $\sigma_{\omega}^2 \cdot \tau^2$.

2. Проведенный анализ влияния фазовых и частотных расстройек КГ, а по сути неполного знания параметров (начальной фазы и частоты) отраженного сигнала, на качество когерентного накопления эхо-сигналов дает возможность предъявить требования к точности характеристик КГ в когерентно-импульсных РЛС обзорного типа с эквивалентной внутренней когерентностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулев П.А., Степин В.И. *Методы и устройства СДЦ*. – М.: Радио и связь, 1986. – 306 с.
2. Красногоров С.И. *Матричный анализ в условиях отыскания экстремумов*. – Ногинск: ЦНИИ МО, 1998. – 100 с.
3. Райс Фр. и Томас Дж. *Частотный метод анализа ограничений видимости цели на фоне местных помех вследствие статистических и нестатистических процессов в когерентных системах селекции движущихся целей*. Перевод № 1494/784. Источник: IRE Wescon Convention Record, 1962. – 37 с.
4. Федоренко В.В., Краснокуцкий А.В. *Помехоустойчивость когерентного приема при комплексном воздействии аппаратурных искажений и сосредоточенной помехе // Радиоэлектроника (Изв. вузов)*. – 1999. – № 4. – С. 35 – 39.

Поступила 24.06.2003

ДЕДЕНОК Виктор Петрович, доктор техн. наук, профессор, начальник научного центра при Харьковском военном университете. В 1975 году окончил ВИРТА ПВО им. Говорова. Область научных интересов – статистическая теория космических систем.

ХАЧАТУРОВ Валерий Рубенович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научного центра при Харьковском военном университете. В 1975 окончил ВИРТА ПВО им. Говорова. Область научных интересов – радиолокация.

ПЕТРЕНКО Алексей Сергеевич, адъюнкт Харьковского военного университета. Область научных интересов – радиолокация.