

УДК 681.32

А.М. Сотников<sup>1</sup>, В.И. Барсов<sup>2</sup>, Ю.В. Самсонов<sup>3</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>3</sup>Академия внутренних войск МВД Украины, Харьков

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ПРИЕМА С ПОДСВЕТКОЙ

Получено аналитическое выражение для отношения сигнал-шум на выходе радиометрического канала приема с подсветкой. Приведены результаты экспериментальной оценки повышения выходного отношения сигнал-шум радиометрического канала при использовании подсветки.

**Ключевые слова:** сигнал-шум, подсветка, радиометрический канал, поверхность визирования.

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время для решения ряда задач, связанных с мониторингом земной поверхности, широкое применение находят радиометрические системы, характеристики которых определяются, прежде всего, радиотепловыми контрастами поверхности визирования (ПВ) [1]. На слабоконтрастных участках ПВ работоспособность радиометрического канала может быть нарушена, что обуславливает необходимость поиска технических решений, позволяющих осуществлять мониторинг различных по контрастности участков местности. Одним из возможных способов улучшения характеристик радиометрического канала является применение генераторов как узкополосных, так и широкополосных сигналов с целью подсветки ПВ. Однако эффективность такого подхода требует в виду отсутствия необходимых оценок выполнения как теоретических, так и экспериментальных исследований.

**Целью статьи** является получение аналитического выражения для оценки выходного отношения сигнал-шум в радиометрическом канале с подсветкой и подтверждение теоретических оценок экспериментальными.

### Изложение основного материала

Решение задачи теоретической оценки выходного отношения сигнал-шум в радиометрическом канале с подсветкой проводилось в предположении, что выделение полезных составляющих сигнала в канале осуществляется на основе метода декорреляции [2]. При этом зондирующий и помеховый сигналы представлены как независимые узкополосные гауссовские стационарные случайные процессы с независимыми средними значениями:

$$U_3(t) = \sqrt{\frac{P_r}{2}} [U_c(t) \cos \omega_0 t + U_3(t) \sin \omega_0 t + U_c(t - \tau) \cos \omega_0 t + U_3(t) \sin \omega_0(t - \tau)] \quad (1)$$

где  $P_r, \omega_0$  – соответственно мощность и центральная

частота спектра зондирующего сигнала;  $\tau$  – время задержки сигнала.

$U_c(t) = U_0(t) \cos \varphi(t); U_3(t) = U_0(t) \sin \varphi(t)$  – соответственно нормированные косинусоидальная и синусоидальная составляющие огибающей зондирующего сигнала;

$U_0(t), \varphi(t)$  – огибающая и фаза сигнала генератора шума (ГШ), представляющие собой медленно изменяющиеся функции времени по сравнению с

$$\cos \omega_0 t; U_0(t) \geq 0, \varphi(t) \in [-\pi, \pi]; \xi(t) = P_{ш} [\xi_c \cos \omega_0 t + \xi_3 \sin \omega_0 t], \quad (2)$$

где  $P_{ш}, \omega_0$  – соответственно мощность и центральная частота спектра помеховой составляющей;

$\xi_c(t) = \xi(t) \cos \varphi(t), \xi_3(t) = \xi(t) \sin \varphi(t)$  – соответственно, синусоидальная и косинусоидальная нормированные составляющие огибающей помехового сигнала;

$\xi(t) \geq 0, \varphi(t) \in [-\pi, \pi]$  – соответственно огибающая и фаза помехового сигнала.

Суммарный сигнал на выходе высокочастотной части корреляционного радиометра [3] без учета расстояния до визируемой поверхности, диаграммы направленности антенны, потерь при распространении сигнала в атмосфере и при переотражении имеет вид:

$$U_\Sigma(t) = \sqrt{P_r/2} [U_c(t) \cos \omega_0 t + U_3(t) \sin \omega_0 t + U_c(t - \tau) \cos \omega_0 t + U_3(t) \sin \omega_0(t - \tau)] + \sqrt{P_{ш}} [\xi_c(t) \cos \omega_0 t + \xi_3(t) \sin \omega_0 t]. \quad (3)$$

В результате прохождения через функциональные блоки радиометра прямой и задержанный на  $\tau$  сигналы, соответственно на первом и втором входах перемножителя (Пм) имеют вид:

$$U_1(t) = \sqrt{P_r/6} [U_c(t - \tau) \cos \omega_0(t - \tau) + U_3(t - \tau) \times \sin \omega_0(t - \tau) + U_c(t - 2\tau) \cos \omega_0(t - 2\tau) + U_3(t - 2\tau) \sin \omega_0(t - 2\tau)] + \sqrt{P_{ш}/3} \times [\xi_c(t - \tau) \cos \omega_0(t - \tau) + \xi_3(t - \tau) \sin \omega_0(t - \tau)]; \quad (4)$$

$$U_{11}(t) = \sqrt{P_r/12} [U_c(t) \cos \omega_0 t + U_3(t) \sin \omega_0 t + U_c(t-\tau) \cos \omega_0(t-\tau) + U_3(t-\tau) \sin \omega_0(t-\tau) + \sqrt{P_{ш}}/6 [\xi_c(t) \cos \omega_0 t + \xi_3(t) \sin \omega_0 t]; \quad (5)$$

На перемножителе оказываются введенными в синхронизм составляющие  $U_{c,3}(t-\tau)$  суммарного сигнала. Остальные составляющие, как следует из свойств гауссовских процессов [5], будут некоррелированными. Поэтому после фильтра нижних частот (ФНЧ) с полосой пропускания  $\Delta F$ , который как идеальный интегратор выполняет операцию статистического усреднения [6] и подавляет компоненту сигнала на частоте  $2\omega_0$ , средние значения шумовых. Системных и комбинационных составляющих будут равны нулю. В общем виде отношение сигнал-шум по мощности [4] на выходе радиометра имеет вид:

$$q_{\text{вых}}^2 = \sigma_c^2 / \sigma_{\text{фл}}^2, \quad (6)$$

где  $\sigma_c^2$ ,  $\sigma_{\text{фл}}^2$  – средняя мощность (дисперсия) соответственно полезной и флуктуационной компонент сигнала на выходе ПМ.

Энергетический спектр сигнала на выходе ПМ [5,6] можно представить в виде

$$S_{\text{пм}}(f) = S_o(f) + S_{\text{фл}}(f), \quad (7)$$

где  $S_o(f)$  – дискретная составляющая, обусловленная взаимодействием синхронных компонент полезного сигнала;  $S_{\text{фл}}(f)$  – флуктуационная составляющая.

Из (6) и (7) получаем:

$$q_{\text{вых}}^2 = \int_0^{\Delta f} S_o(f) df / \int_0^{\Delta f} S_{\text{фл}}(f) df. \quad (8)$$

В рамках корреляционной теории расчет составляющих энергетического спектра проводится в соответствии с теоремой Винера-Хинчина [4, 5], совершая обратное преобразование Фурье над автокорреляционной функцией сигнала на выходе ПМ, имеющей вид

$$R_{\text{пм}}(\eta) = \langle U_{\text{пм}}(t) U_{\text{пм}}(t+\eta) \rangle = \frac{P_r^2}{72} + \frac{P_r^2}{36} \rho^2(\eta) - \frac{P_r P_{ш}}{12} \rho^2(\eta) + \frac{P_{ш}^2}{36} \rho^2(\eta), \quad (9)$$

где  $U_{\text{пм}}(t) = U_1(t) U_{11}(t)$ ,  $\langle \cdot \rangle$  – символ, обозначающий операции статистического усреднения;

$\rho(\eta) = \rho_{ш}(\eta) = \rho_c(\eta)$  – коэффициенты корреляции сигнала и шума, причем  $\rho(\eta) = \sin c \Delta \omega \eta$  [5].

После интегрирования (9) имеем

$$S_{\text{пм}}(f) = \frac{P_r^2}{36} \delta(f) + \left( \frac{P_r^2}{36} + \frac{P_r P_{ш}}{12} + \frac{P_{ш}^2}{36} \right) \frac{1}{\Delta f} \left( 1 - \frac{\Delta F}{\Delta f} \right), \quad (10)$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания приемника;

$$\frac{P_r^2}{36} \delta(f) = S_o(f);$$

$$\left( \frac{P_r^2}{36} + \frac{P_r P_{ш}}{12} + \frac{P_{ш}^2}{36} \right) \frac{1}{\Delta f} \left( 1 - \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) = S_{\text{фл}}(f).$$

В итоге, подставляя (10) в (8), получаем:

$$q_{\text{вых}}^2 = P_r^2 / \left( \left( P_r^2 + 3P_r P_{ш} + P_{ш}^2 \right) \frac{\Delta F}{\Delta f} \left( 1 - \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \right). \quad (11)$$

Учитывая, что  $q_{\text{вых}}^2 = \overline{P_c^2} / \overline{P_{ш}^2} = P_r^2 / (4P_{ш}^2)$ , выразим  $q_{\text{вых}}$  через  $q_{\text{вх}}$ :

$$q_{\text{вых}}^2 = q_{\text{вх}}^2 / \left( \left( q_{\text{вх}}^2 + \frac{3}{2} q_{\text{вх}} + \frac{1}{4} \right) \frac{\Delta F}{\Delta f} \left( 1 - \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \right).$$

И для реального соотношения  $q_{\text{вх}} \ll 1$  имеем

$$q_{\text{вых}} = 2q_{\text{вх}} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}} = 2 \frac{T_c}{T_{ш}} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что отношение сигнал-шум на выходе радиометра, использующего в качестве подсветки ШСС при  $q_{\text{вх}} \ll 1$ , равно удвоенному отношению сигнал-шум на выходе идеального радиометра [3].

Для теоретической и экспериментальной оценки взаимного влияния приемных трактов совмещенных по ширине спектров сигналов системы навигации применен радиометрический измерительный комплекс (РМИК) миллиметрового диапазона волн, позволяющий формировать радиометрические изображения (РМИ) изучаемых объектов на различных фонах земной поверхности.

Структурная схема РМИК ММДВ представлена на рис. 1.

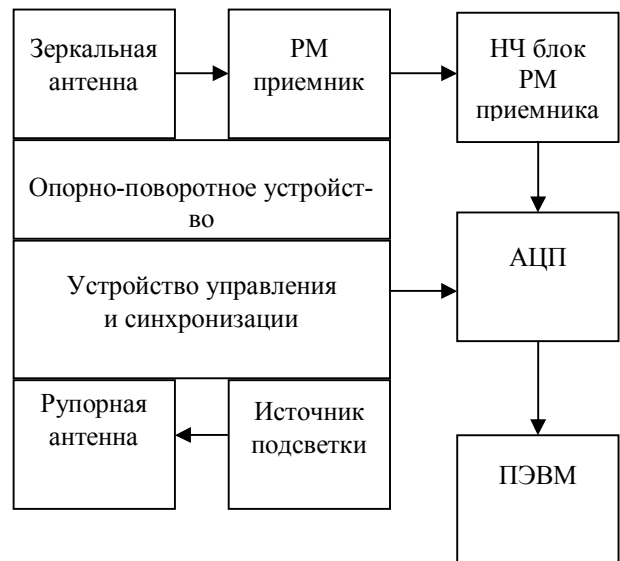


Рис. 1. Структурная схема РМИК ММДВ

Опорно-поворотное устройство, на котором размещены антенна и высокочастотная часть РМ приемника, осуществляет обзор пространства в диапазоне углов: по азимуту 360 градусов, по углу места 180 градусов (от надира). Время полного поворота в азимутальной плоскости 10...120 с.

Устройство управления и синхронизации задает режим работы опорно-поворотному устройству и обеспечивает синхронность работы поворотного устройства и ПЭВМ в процессе получения РМИ.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) обеспечивает согласование РМ приемника с ПЭВМ (Pentium-100), преобразуя медленно меняющееся напряжение с аналогового выхода РМ в цифровую последовательность. АЦП является многоканальным и допускает проведение одновременных измерений и параллельной обработки сигналов 8 каналов (датчиков). Количество уровней дискретизации входного сигнала в каждом из каналов 1024 (10 разрядов двоичного кода). Все компоненты РМИК используют питающее напряжение промышленной сети (220В, 50Гц переменного тока). Потребляемая мощность РМИК при работе опорно-поворотного устройства – не более 300 Вт (в момент включения монитора и системного блока ПЭВМ потребляемая мощность кратковременно возрастает до 600 Вт). Для обеспечения устойчивого функционирования рекомендуется ПЭВМ подключать к сети через источник бесперебойного питания, выполняющий функцию фильтра.

#### Алгоритм работы РМИК ММДВ.

1. Включение аппаратуры и ПЭВМ.
2. Загрузка операционной системы в память ПЭВМ.
3. Загрузка программы, осуществляющей запросы на АЦП, регистрацию получаемых данных, визуализацию получаемого радиометрического изображения.
4. Ввод исходных данных: сектор обзора по азимуту и углу места, количество строк и столбцов в изображении, метод фильтрации (усреднение, медианная фильтрация), размер окна, по которому производится сглаживание и др.
5. Запуск опорно-поворотного устройства в режиме автоматического сканирования.
6. Осуществление радиометрической съемки визуруемого кадра.
7. Выключение режима сканирования.
8. Запись результатов съемки на диск в виде:
  - текстового файла, содержащего таблицу значений отсчетов АЦП;
  - графического файла формата BMP;
  - информационного текстового файла, описывающего условия проведения эксперимента.

#### Алгоритмы обработки информации.

В процессе производства измерений фильтрация шумов АЦП и радиометра производится следующим образом.

1. После запуска программы вход №1 АЦП переходит в режим ожидания синхронизирующего импульса от «концевика» начала строки.
2. После получения сигнала начала строки активизируются входы АЦП №2 и №3. Вход №2 ожидает синхронизирующий импульс от концевика конца строки. По входу №3 с периодом ~ 50 мс регистрируются значения напряжения, пропорциональные радиояркости, поступающие с выхода радиометрического приемника. Указанные значения с выхода АЦП записываются в оперативную память

ПЭВМ в виде массива 1 целых чисел.

3. После получения на входе №2 синхронизирующего импульса конца строки вход №3 АЦП блокируется и начинается обработка полученного массива чисел.

4. Производится подсчет общего количества элементов в массиве 1.

5. Путем деления общего количества элементов в массиве 1 на заданное количество столбцов изображения N определяется шаг, с которым осуществляется выборка элементов из массива 2.

6. Путем выборки элементов массива 1 с рассчитанным шагом формируется массив 2 из N значений. Если при запуске программы опция фильтрации шумов АЦП и радиометра не была включена, массив 2 записывается в память ПЭВМ в виде одной строки. Из всех полученных таким образом строк по окончании сканирования формируется массив изображения.

7. При включенной опции фильтрации шумов из массива 1 извлекаются фрагменты – массивы, первыми элементами которых являются значениями массива 2, длина фрагментов соответствует размеру окна, заданному в исходных данных.

8. В зависимости от заданного типа обработки по каждому из фрагментов вычисляется среднее значение (усреднение) или находится медианное значение (медианная фильтрация). Из полученных значений формируется результирующий массив.

#### Методика проведения эксперимента

Основным режимом получения РМИ является режим «автоматического» управления положением опорно-поворотного устройства. В этом режиме осуществляется строчное сканирование луча диаграммы направленности антенны РМИК в заданном секторе телесного угла с последующим формированием растровых полутоновых, либо цветных изображений на экране дисплея ПЭВМ. При этом сигнал с выхода аналогового канала РМ поступает на АЦП управляющей ЭВМ, а получаемые данные регистрируются в памяти ПЭВМ в виде относительных двоичных отсчетов (уровней сигнала) для каждой точки изображения.

Для визуализации результатов радиометрической съемки производилась предварительная обработка, а именно: согласование динамического диапазона результатов измерений с динамическим диапазоном видеоадаптера, повышение контрастности изображения, нелинейная (логарифмическая) обработка яркости изображения для увеличения контраста объектов, имеющих высокую излучательную способность, двумерная межпиксельная аппроксимация значений яркости изображения для уменьшения эффекта дискретизации изображения при его масштабировании (увеличении).

Результат медианной фильтрации с шириной сглаживающего окна 5 представлен в виде графика на рис. 2, где тонкая кривая – данные без обработки, жирная кривая – результат медианной фильтрации.

В результаті проведеного експеримента отримані зображення правого (рис. 3) і лівого (рис. 4)

бортов танка Т-72 без «підсвітки» і лівого борта танка Т-72 з «підсвіткою» ствола 3-см РЛК (рис. 5).

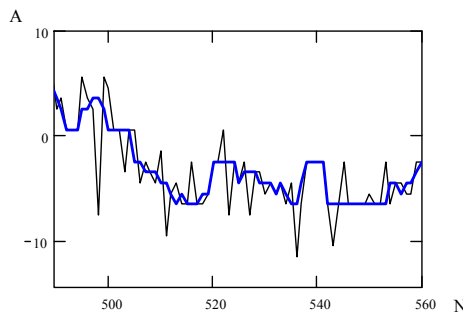


Рис. 2. Результат медіанної фільтрації шумів АЦП і радіометра



Рис. 4. Зображення лівого борта танка Т-72 без шумової «підсвітки»

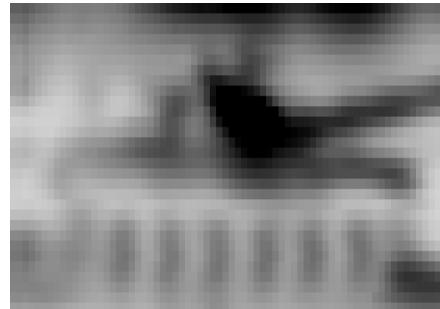


Рис. 3. Зображення правого борта танка Т-72 без шумової «підсвітки»



Рис. 5. Зображення лівого борта танка Т-72 з «підсвіткою» ствола 3-см РЛК

## Вывод

1. На основі аналізу отриманого аналітичного вираження для відношення сигнал-шум можна зробити висновок про подвоєння підвищення поміхоустойчивості радіометричних систем за рахунок застосування підсвітки широкополосного стохастичного сигналу.

2. Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують високу ефективність розділення каналів за шириною спектрів сигналів.

## Список литературы

1. Swift C.T., Ruf C.T., Tannor A.S., Levin D.O. // *IGARSS 88: Remote Sens. Today's Solht. Tomorrow's inf. Needs. Proc. Symp., Zurich, 8-11 Sept., 1986.*

2. Milton Andrew S. // *Int. Geos. And Remots Sens. Symp., Ann Arbor, Michigan. 18-21 May, 1987.*

3. Николаев А.Г., Перцов С.В. *Радиотеплолокация (пассивная радиолокация) / А.Г. Николаев, С.В. Перцов. – М.: Воениздат, 1970. – 132 с.*

4. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.*

5. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.*

6. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы. 4-е изд. Перераб. и доп. / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.*

Поступила в редколлегию 17.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ТЕОРЕТИЧНА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ-ШУМ В РАДІОМЕТРИЧНИХ КАНАЛАХ ПРИЙОМУ З ПІДСВІТКОЮ

О.М. Сотніков, В.І. Барсов, Ю.В. Самсонов

Отримано аналітичний вираз для відношення сигнал-шум на виході радіометричного каналу прийому з підсвіткою. Приведено результати експериментальної оцінки підвищення вихідного відношення сигнал-шум радіометричного каналу при використанні підсвітки.

**Ключові слова:** сигнал-шум, підсвітка, радіометричний канал, поверхня візування.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN THE RADIOMETRIC CHANNELS RECEPTION WITH LIGHT

A.M. Sotnikov, V.I. Barsov, Y.V. Samsonov

We obtain an analytic expression for the ratio of signal-to-noise ratio at the output of the radiometric channel reception with light. Results of experimental evaluation of the increase of the output signal to noise ratio radiometric channel when using the backlight.

**Keywords:** signal-to-noise, lighting, radiometric channel, the surface of sight.