

Омский научно-исследовательский институт приборостроения

к.ф.-м.н. Зачатейский Д.Е.,
Салтыков О.В.,
к.т.н. Юрьев А.Н.

Модель пространственно- временного коротковолнового радиоканала

Докладчик:
Салтыков О.В.



Experimental Confirmation of an HF Channel Model

CLARK C. WATTERSON, JOHN R. JUROSHEK, AND WILLIAM D. BENSEMA, MEMBER, IEEE

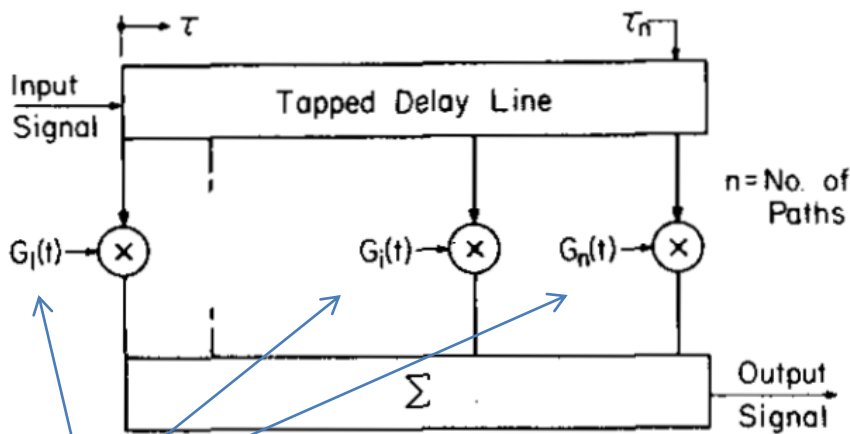


Fig. 1. Channel model.

Случайные процессы

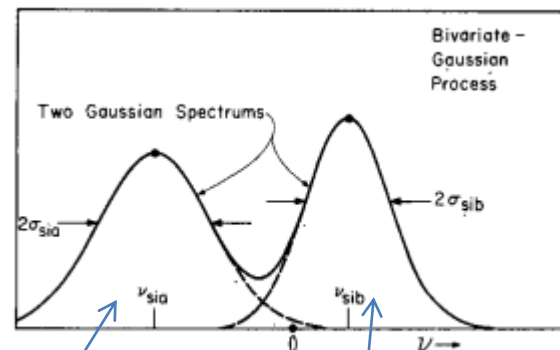


Fig. 2. Tap-gain spectrum in channel model.

$$G_{si}(t) = G_{sia}(t) \exp(j2\pi\nu_{sia}t) + G_{sib}(t) \exp(j2\pi\nu_{sib}t).$$

$G_{sia}(t)$ and $G_{sib}(t)$ are two independent complex (bivariate)-Gaussian stationary ergodic random processes, each with zero-mean values and independent quadrature components with equal rms values and identical spectrums. Specifically, if $G_{sia}(t)$ is defined in terms of its real and imaginary components by

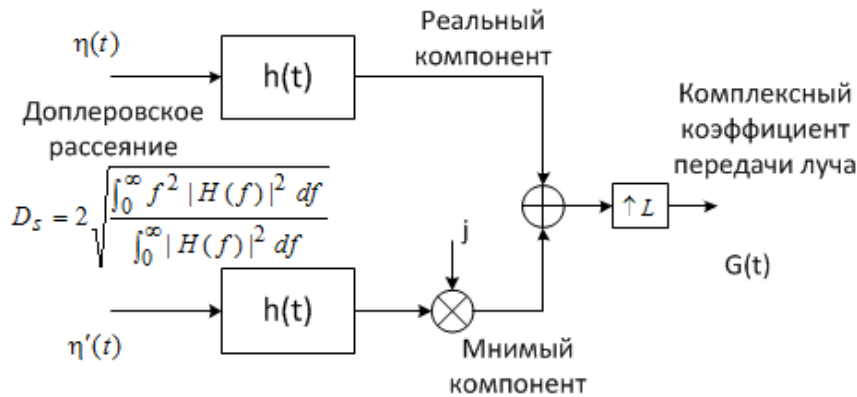
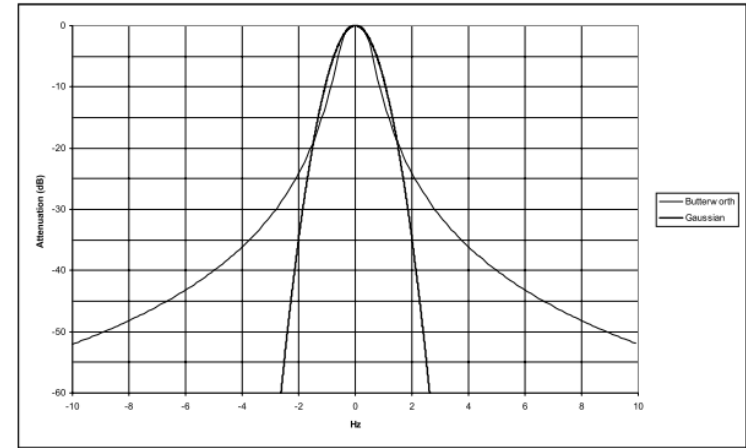
$$G_{sia}(t) = g_{sia}(t) + jg_{sia}(t) \quad (8)$$

then $g_{sia}(t)$ and $g_{sia}(t)$ are independent real Gaussian processes with the following single-time joint density function:

Случайные процессы $G(t)$ модели Ваттерсона

$h(t)$ – ФНЧ с полосой $D_s/2$ (фильтр Гаусса или Баттерворта с 2-мя полюсами):

Figure 5 - Gaussian and Butterworth Filter Spectra

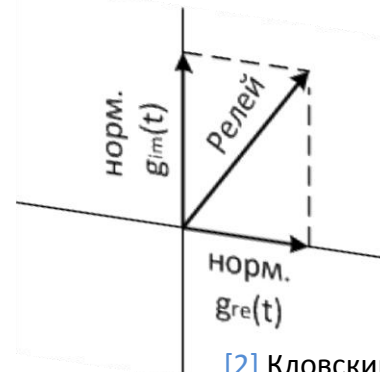


$\eta(t)$ и $\eta'(t)$ – гауссовские независимые последовательности;
 $h(t)$ – фильтр нижних частот.

Рекурсивный фильтр Баттерворта, имеющий 2 полюса [1]:

$$G_l(k) = g_l(k) + jg'_l(k) = b_0[\eta(k) + j\eta'(k)] + b_1[\eta(k-1) + j\eta'(k-1)] + b_2[\eta(k-2) + j\eta'(k-2)] - a_1[g_l(k-1) + jg'_l(k-1)] - a_2[g_l(k-2) + jg'_l(k-2)],$$

где $\eta(k)$ и $\eta'(k)$ – некоррелированные последовательности случайных *нормальных чисел*, причем при реальной и мнимой частях подразумеваются различные *независимые реализации*; коэффициенты a_i и b_i определяются для фильтра Баттерворта 2-го порядка из заданной величины частотного (доплеровского) рассеяния канала $D_s/2$.

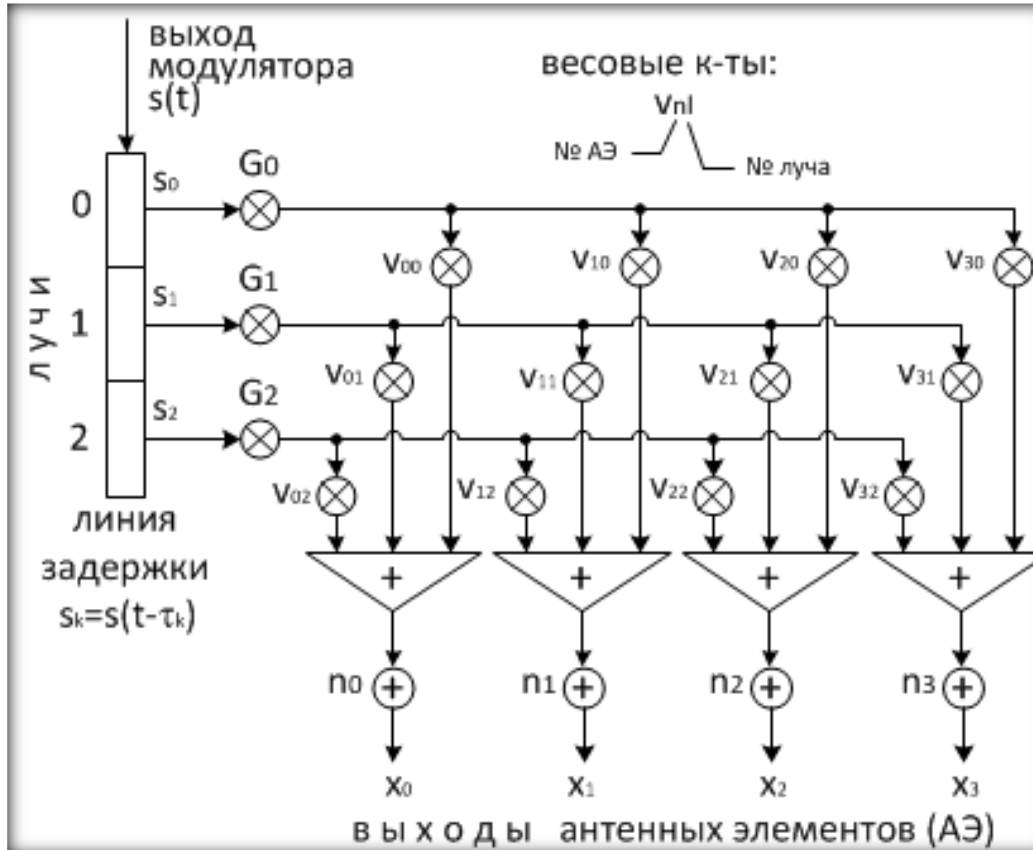


[1] W. N. Furman and J. W. Nieto (Harris Corporation), "Understanding HF channel simulator requirements in order to reduce HF modem performance measurement variability," in *Proc. 6th Nordic Shortwave Conf. HF*, Fårö, Sweden, Aug. 2001.

Обобщенно-гауссовская 4-х параметрическая модель [2]: 1) $m_x=m_y=0, \sigma_x=\sigma_y=\sigma$ - Релей, 2) $m_x=m_y \neq 0, \dots$ -Райс, 3) $\sigma_x \neq 0$ – односторонне-гауссовский (самый «плохой»)

[2] Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. (2е изд.), М., «Радио и связь», 1982, -304 с.

пространственно-временная модель канала



$$\mathbf{s}(t) = [s_0(k), s_1(k), s_2(k)]^T$$

$$\mathbf{x}(k) = [x_0(k), x_1(k), x_2(k), x_3(k)]^T$$

Модель канала:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{V} \mathbf{\Gamma} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)$$

Ваттерсоновские замирания лучей:

$$\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(\mathbf{G}) = \begin{bmatrix} G_0 & & 0 \\ & G_1 & \\ 0 & & G_2 \end{bmatrix}$$

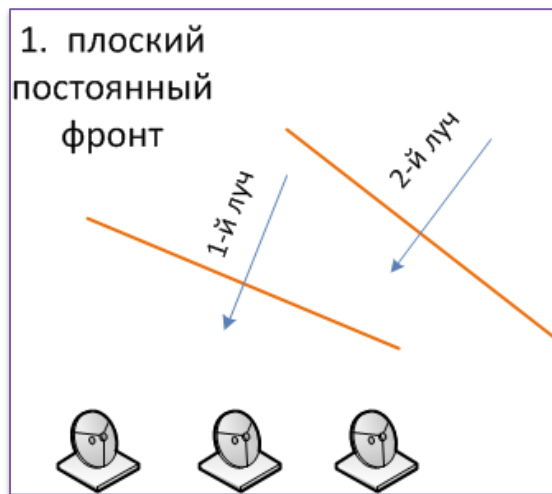
Пространственная матрица смешивания:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_0 \quad \mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{j\varphi_{10}} & e^{j\varphi_{11}} & e^{j\varphi_{12}} \\ e^{j\varphi_{20}} & e^{j\varphi_{21}} & e^{j\varphi_{22}} \\ e^{j\varphi_{30}} & e^{j\varphi_{31}} & e^{j\varphi_{32}} \end{bmatrix}$$

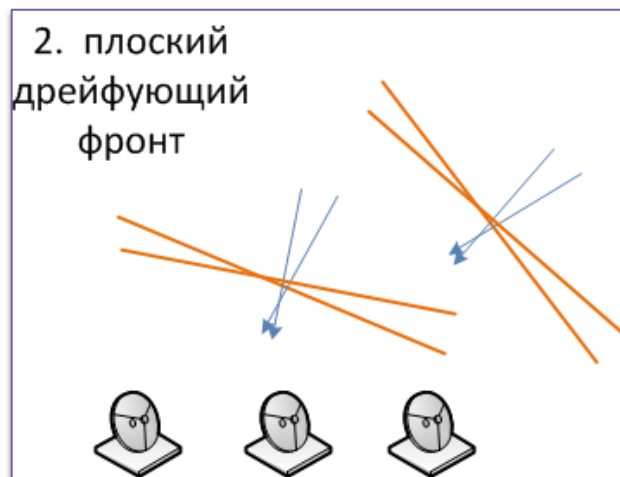
$$\text{АБГШ: } \overline{n_i(k)n_j(l)} = \sigma_N^2 \delta(k-l)\delta(i-j)$$

Варианты модели канала

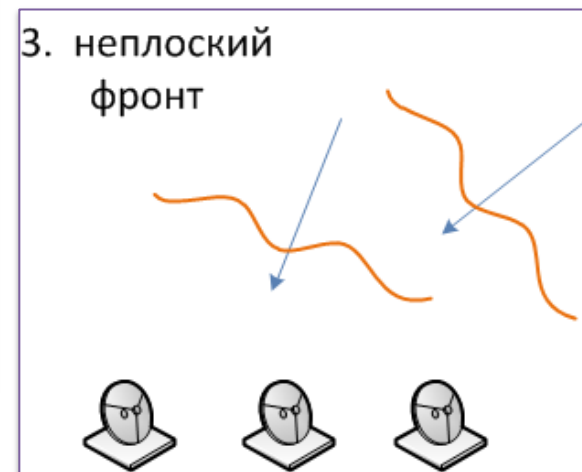
ФАР



ФАР



разнесенный прием

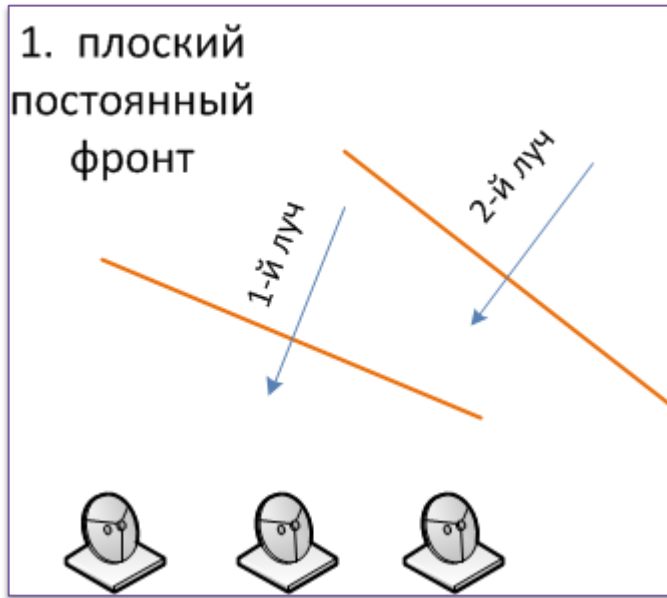


Как показывают измерения углов прихода радиоволны [3], на среднеширотных радиоприемных линиях КВ диапазона дальностью 1 – 3 тыс. км, в течение часа, могут наблюдаться вариации **азимутальных углов до 6°** и углов прихода (или **углов места**) – до 10° .

[3] Чайка Е.Г., Вертоградов Г.Г., «Использование данных текущей диагностики ионосферы в задаче КВ-пеленгации и однопозиционного местоопределения»//XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»РРВ-24. Иркутск, 29 июня — 5 июля 2014 г. Труды конференции. Иркутск:ИСЗФ СО РАН. Т.II. 2014, 267 с. С.41-44.

1-й вариант модели лучей постоянных направлений

Пример линейной эквидистантной решетки



Апертурный вектор каждого луча (вектор набегов фаз на АЭ):

$$\mathbf{v}_l = [1, e^{j\varphi_l}, e^{j2\varphi_l}, e^{j3\varphi_l}]^T$$

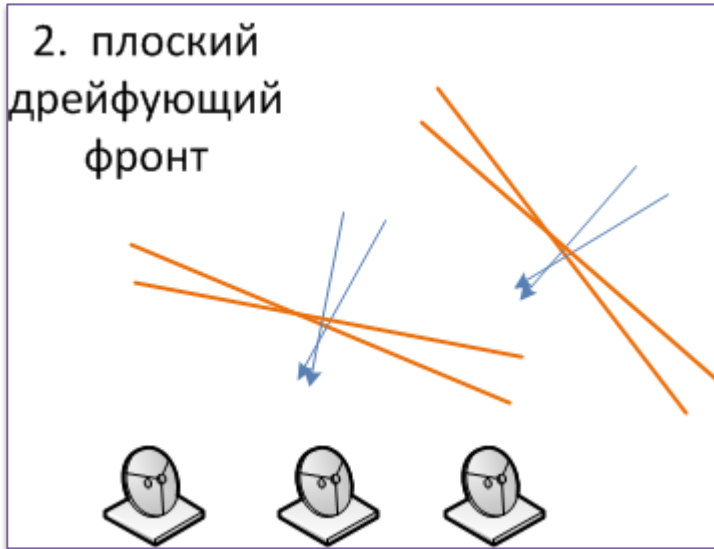
Матрица смешивания состоит из постоянных апертурных векторов кратных фаз на антенных элементах:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_0 \quad \mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{j\varphi_1} & e^{j\varphi_2} & e^{j\varphi_3} \\ e^{j2\varphi_1} & e^{j2\varphi_2} & e^{j2\varphi_3} \\ e^{j3\varphi_1} & e^{j3\varphi_2} & e^{j3\varphi_3} \end{bmatrix}$$

[4] С.А. Метелёв, «Модификация модели Ватерсона ионосферного канала коротковолновой радиосвязи для адаптивного пространственно разнесенного приема». *Известия вузов. Радиофизика*. 2012, том LV, № 4, стр. 266-279.

2-й вариант модели лучей дрейфующих направлений

Пример линейной эквидистантной решетки



Формирование СП $\Delta\varphi(k)$ - фильтрация нормальной случайной величины $\eta(k)$ фильтром Баттерворта с 2-мя полюсами:

$$\Delta\varphi(k) = \sigma(b_0\eta(k) + b_1\eta(k-1) + b_2\eta(k-2)) - a_1\Delta\varphi(k-1) - a_2\Delta\varphi(k-2)$$

σ - с.к.о. углов прихода волны каждого луча;
 a_i и b_i – к-ты фильтра Баттерворта 2-го порядка с полосой обратнопропорциональной квазипериоду дрейфа угла прихода волны.

Апертурный вектор каждого луча имеет дрейфующую составляющую фазы (случайный процесс, СП):

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_l &= [1, e^{j(\varphi_l + \Delta\varphi_l)}, e^{j2(\varphi_l + \Delta\varphi_l)}, e^{j3(\varphi_l + \Delta\varphi_l)}]^T \\ &= \mathbf{v}_l \circ \Delta\mathbf{v}_l = \text{diag}(\Delta\mathbf{v}_l) \mathbf{v}_l \end{aligned}$$

$$\Delta\mathbf{v}_l = [1, e^{j\Delta\varphi_l}, e^{j2\Delta\varphi_l}, e^{j3\Delta\varphi_l}]^T$$

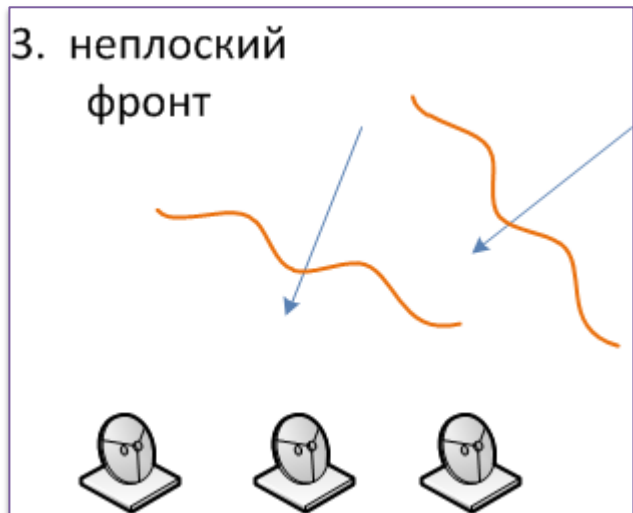
Оператор \circ – покомпонентное умножение векторов, $\text{diag}(\cdot)$ – диагональная матрица, по главной диагонали которой размещаются элементы вектора

Матрица смешивания:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{w}_0 \quad \mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2]$$

3-й вариант модели случайных фронтов лучей

Пример линейной эквидистантной решетки



Вводится СП, нарушающий кратность фаз апертурного вектора:

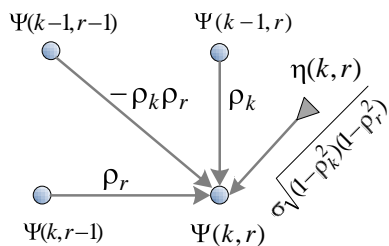
$$\mathbf{w}_l = [e^{j\psi_{l0}}, e^{j(\phi_l + \psi_{l1})}, e^{j(2\phi_l + \psi_{l2})}, e^{j(3\phi_l + \psi_{l3})}]^T$$

$$= \mathbf{v}_l \circ \Delta \mathbf{w}_l = \text{diag}(\Delta \mathbf{w}_l) \mathbf{v}_l,$$

$$\Delta \mathbf{w}_l = [e^{j\psi_{0l}}, e^{j\psi_{1l}}, e^{j\psi_{2l}}, e^{j\psi_{3l}}]^T$$

Матрица смешивания: $\mathbf{V} = [\mathbf{w}_0 \quad \mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2]$

Дополнительный вектор $\Delta \mathbf{w}$ образует СП, между компонентами которого имеется статистическая зависимость: существует корреляция во времени (как во 2-м варианте модели), а также имеется пространственная корреляция между различными $\Psi_i(k)$ и $\Psi_j(k)$. Для каждого луча формируется свой независимый двумерный СП. Трехточечный рекуррентный алгоритм:

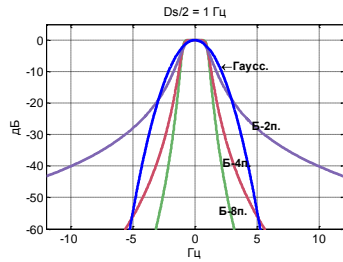


$$\Psi(k, r) = \rho_k \Psi(k-1, r) + \rho_r \Psi(k, r-1) - \rho_k \rho_r \Psi(k-1, r-1) + \sigma \sqrt{(1 - \rho_k^2)(1 - \rho_r^2)} \eta(k, r)$$

σ - с.к.о. изменения угла прихода луча; $\rho_k = \exp(-Ds/Fs)$ - к-т корреляции СП во времени; $\rho_r = \exp(-d/\tau r)$ - к-т корреляции по пространству, d - расстояние между АЭ, τr - интервал корреляции по пространству, который для КВ канала полагается равным $(20 \div 25)\lambda$, м.

Моделирование

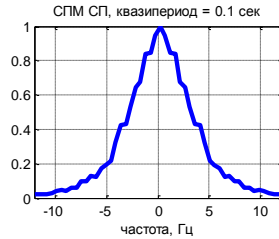
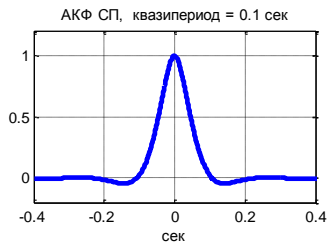
- В разработанной модели формируются три СП: 1) замирания каждого луча (модель Ваттерсона), $G_l(k) = g(k) + jg'(k)$ (комплексный), 2) дрейф фронта волны по углу прихода, $\Delta\varphi_l(k)$ (вещественный), 3) двумерный СП рассеяния плоского фронта волны $\Psi_l(k)$.



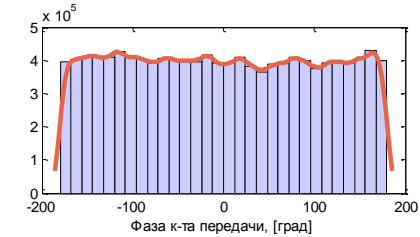
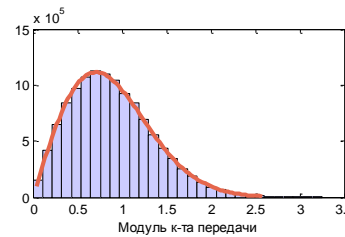
АЧХ фильтра Баттерворта различных порядков в сравнении с гауссовским фильтром



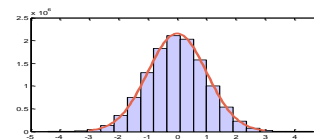
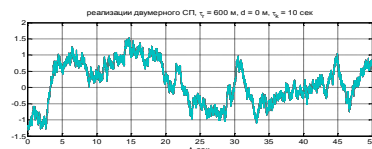
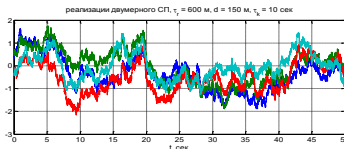
Пример реализации коэффициента передачи замирающего канала (слева - составляющие двух образующих векторов $g(k) + jg'(k)$, справа – модуль и фаза комплексного коэффициента передачи)



АКФ (слева) и СПМ (справа) СП дрейфа угла прихода волны $\Delta\varphi(k)$



Пример гистограмм распределения модуля и фазы коэффициента передачи замирающего канала (с аппроксимациями ожидаемых функций распределения – Релея и равномерного распределений)



Реализации 2-мерного СП для 4 АЭ: левый – СП при $\rho_r < 1$ (по пространству), средний – при $\rho_r = 1$ (реализации сливаются в одну). Правый – гистограмма распределения