Метод одновременной передачи групп кадров видео с мини беспилотных летательных аппаратов

Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова

Вятский государственный университет, Киров, 610000, Россия
E-mail: eppetrov@mail.ru

Широкое применение мини беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) с ограниченными энергетическими ресурсами (ЭР) при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) сдерживается сложностью передачи видеопоследовательностей (ВП) многоразрядных цифровых изображений (МЦИ) высокого разрешения в реальном масштабе времени. Сокращение времени передачи ВП МЦИ оказалось сложной задачей, решение которой известными методами компрессии МЦИ из-за ограничений ЭР на борту МБЛА исключено. В данной работе предложен простой метод сокращения времени передачи ВП МЦИ путем объединения соседних кадров исходной ВП МЦИ на борту МБЛА без вычислительных операций. Время передачи преобразованной ВП МЦИ сокращается в число раз, равное числу объединенных соседних МЦИ исходной ВП. Для передачи преобразованной ВП МЦИ в работе используются многофазные фазоманипулированные (МФМ) сигналы, недостатком которых является снижение помехоустойчивости в два раза при каждом делении фазы МФМ сигналов на два. Компенсация потерь помехоустойчивости осуществляется эффективной реализацией статистической избыточности исходной ВП МЦИ для повышения помехоустойчивости приема МФМ сигналов. Реализация статистической избыточности ВП МЦИ позволила сократить время передачи исходной ВП МЦИ в два – четыре раза. Дальнейшее сокращение времени передачи исходной ВП МЦИ за счет объединения более четырех кадров исходной ВП МЦИ ограничено возможностью компенсации потерь помехоустойчивости, вызванной применением МФМ сигналов.

Ключевые слова: математическая модель видеопоследовательности, мини беспилотный летательный аппарат, многоразрядные цифровые изображения, цепи Маркова с несколькими состояниями, алгоритм трехмерной нелинейной фильтрации, многопозиционные фазоманипулированные сигналы

Одобрена к печати: 06.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-49-57

Введение

В системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на мини беспилотных летательных аппаратах (МБЛА) с ограниченными энергетическими ресурсами (ЭР) главным является оперативная передача на Землю видеопоследовательностей (ВП) многоразрядных цифровых изображений (МЦИ) высокого разрешения без искажений в реальном масштабе времени. Для достижения высокой оперативности передачи ВП оригиналов МЦИ высокого разрешения на Землю в работе предлагается объединять соседние кадры исходной ВП МЦИ, состоящие из разрядных двоичных изображений (РДИ), в ВП МЦИ, состоящие из групп РДИ (ГРДИ) объединенных соседних кадров исходной ВП МЦИ. Таким образом, время передачи исходной ВП МЦИ сократится в число раз, равное числу объединенных МЦИ исходной ВП. Для передачи преобразованной ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, в работе используются многофазные фазоманипулированные (МФМ) сигналы, существенным недостатком которых являются потери помехоустойчивости в два раза при каждом делении фазы МФМ сигналов на два. Поэтому без компенсации потерь помехоустойчивости их использование для сокращения времени передачи ВП МЦИ в системах ДЗЗ на МБЛА не находит применения. Единственным способом компенсации потерь помехоустойчивости без затрат ЭР на борту МБЛА является реализация статистической избыточности, обусловленной большой межкадровой и пространственной корреляциями между пикселями исходной ВП МЦИ на приемной стороне радиоканала (РК).

Полученные при ДЗЗ ВП МЦИ в большинстве случаев имеют экспоненциальные кор-

реляционные функции по трем измерениям (Petrov et al., 2013). Поэтому лучшей аппроксимацией ВП МЦИ и их математическими моделями (ММ) могут служить трехмерные цепи Маркова с несколькими состояниями (Petrov et al., 2013), а для разработки алгоритмов, эффективно реализующих статистическую избыточность ВП МЦИ для компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных МФМ сигналами, можно воспользоваться теорией многомерной нелинейной фильтрации цепей Маркова с несколькими состояниями (Стратонович, 1960; Амиантов, 1971).

Постановка задачи

Требуется на основе теории многомерных условных марковских процессов с дискретными аргументами разработать метод сокращения времени передачи ВП МЦИ без затрат энергетических ресурсов на борту МБЛА с компенсацией потерь помехоустойчивости приема МФМ сигналов в присутствии белого гауссовского шума (БГШ) $n(t)$ с нулевым средним и дисперсией σ_n^2.

Математическая модель ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ

Будем считать, что последовательности РДИ в ВП g-разрядных МЦИ являются трехмерными цепями Маркова с двумя равновероятными $(p_1 = p_2)$ состояниями $\mu_k^{(l)} = M_{i,j,k}^{(l)}$ $\left(l = \overline{1,g}\right)$ с двумя пространственными координатами $\left(i, j;\ i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n}\right)$ и третьей – временной $k = 1, 2, \ldots$, связанной с номером кадра в ВП МЦИ.

Будем считать, что корреляционная функция последовательности РДИ в ВП МЦИ разделима:

$$r_{l,q,s}^{(l)} = \sigma_\mu^{2(l)} \exp\left\{-\alpha_1^{(l)}|l| - \alpha_2^{(l)}|q| - \alpha_3^{(l)}|s|\right\}, \tag{1}$$

где $\sigma_\mu^{2(l)}$ – дисперсия сигнала изображения по каждой координате; $\alpha_1^{(l)}, \alpha_2^{(l)}, \alpha_3^{(l)}$ – коэффициенты, определяющие ширину спектра частот единичного сигнала. В соответствии с (1) последовательность РДИ в исходной ВП МЦИ можно представить как суперпозицию трех одномерных цепей Маркова с двумя равновероятными $\left(p_1^{(l)} = p_2^{(l)}\right)$ состояниями $M_1^{(l)}, M_2^{(l)}$ и матрицами вероятностей переходов (МВП) ${}^1\Pi^{(l)}$, ${}^2\Pi^{(l)}$ от одного состояния к другому внутри РДИ$^{(l)}$ k-го кадра исходной ВП МЦИ и МВП ${}^4\Pi^{(l)}$ между РДИ соседних кадров:

$${}^1\Pi^{(l)} = \begin{bmatrix} {}^1\pi_{11}^{(l)} & {}^1\pi_{12}^{(l)} \\ {}^1\pi_{21}^{(l)} & {}^1\pi_{22}^{(l)} \end{bmatrix}, \quad {}^2\Pi^{(l)} = \begin{bmatrix} {}^2\pi_{11}^{(l)} & {}^2\pi_{12}^{(l)} \\ {}^2\pi_{21}^{(l)} & {}^2\pi_{22}^{(l)} \end{bmatrix}, \quad {}^4\Pi^{(l)} = \begin{bmatrix} {}^4\pi_{11}^{(l)} & {}^4\pi_{12}^{(l)} \\ {}^4\pi_{21}^{(l)} & {}^4\pi_{22}^{(l)} \end{bmatrix}$$

соответственно. Матрица ${}^4\Pi^{(l)}$ характеризует корреляционную связь между соседними

кадрами исходной ВП МЦИ, состоящими из РДИ, где $l = \overline{1, g}$ – номер РДИ в g-разрядном МЦИ.

Пусть в преобразованной ВП g-разрядных МЦИ ГРДИ состоит из двух РДИ, принадлежащих одинаковым разрядам соседних кадров исходной ВП МЦИ (*рис. 1, 2*). Время передачи исходной ВП МЦИ при этом сократится в два раза. Процедура получения ГРДИ, состоящего из двух РДИ, показана на *рис. 1* и *рис. 2*.

Переход от исходной ВП МЦИ к преобразованной ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ,

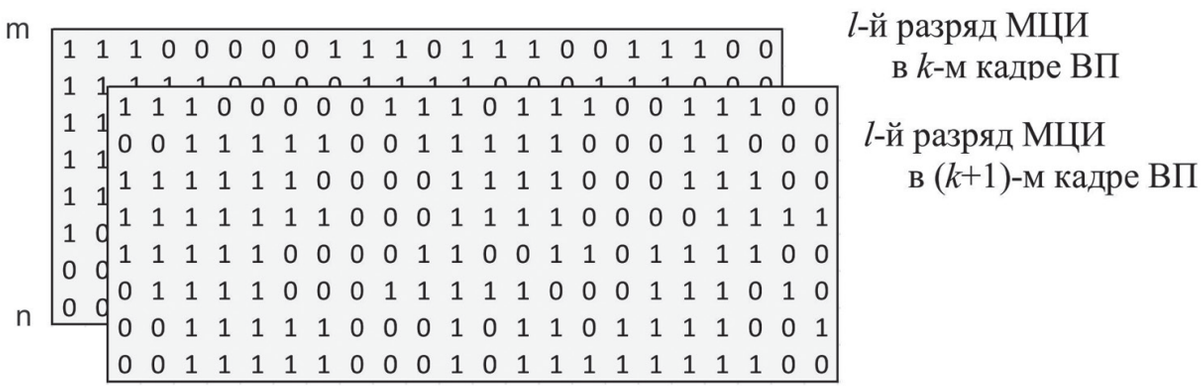


Рис. 1. Формирование ГРДИ из РДИ соседних кадров исходной ВП МЦИ

3	3	3	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	0	0	3	3	3	0	0
3	2	2	1	1	2	2	0	0	1	1	1	2	0	0	0	1	3	3	0	0	0
3	3	2	2	2	2	3	3	0	0	1	1	2	2	2	0	0	1	1	1	0	0
3	3	2	2	1	1	3	3	3	0	1	1	1	2	2	2	0	0	1	1	1	1
3	3	1	1	1	3	3	3	0	1	1	2	2	2	2	0	1	1	3	3	3	0
0	1	1	1	3	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	0	1	1	1	0	3	3
0	0	1	2	2	2	2	0	0	0	3	3	1	1	0	2	2	1	3	3	3	1
0	0	1	1	1	2	2	2	0	0	3	3	3	3	1	2	2	2	2	1	0	0

Рис. 2. ГРДИ, состоящее из двух РДИ соседних кадров ВП

выполняется без вычислительных операций на борту МБЛА. Математическая модель (ММ) преобразованной ВП МЦИ по аналогии с ММ исходной ВП МЦИ (Петров, Трубин, 2007; Petrov et al., 2013) является трехмерной цепью Маркова с четырьмя равновероятными $(p_1 = p_2 = p_3 = p_4)$ состояниями. Применяя подобные процедуры к преобразованной ВП МЦИ, можно получить новую преобразованную ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ с четырьмя РДИ, ММ которой является трехмерная цепь Маркова с шестнадцатью состояниями. Время прямой передачи такой ВП МЦИ сократится в четыре раза и т.д. Потери в помехоустойчивости приема каждой новой преобразованной ВП МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, могут быть скомпенсированы за счет реализации большой статистической избыточности в преобразованной ВП МЦИ трехмерной нелинейной фильтрацией (Петров, Трубин, Частиков, 2007).

Для разработки алгоритмов трехмерной фильтрации преобразованной ВП МЦИ, со-

стоящих из ГРДИ, с двумя однотипными РДИ двух соседних кадров исходной ВП МЦИ необходимо построить ММ ВП МЦИ.

Пусть моделированию подлежит пиксель l-го $\left(l=\overline{1,g}\right)$ РДИ $\nu_4^{(l)}$ в k-м кадре (*рис. 3*), принадлежащий области F_{4k}. Моделирование элементов РДИ всех разрядов $\left(l=\overline{1,g}\right)$, принадлежащих областям F_{1k}, F_{2k} и F_{3k}, проще, чем области F_{4k}, и сводится к моделированию последовательностей одномерных и двумерных стационарных цепей Маркова (Петров, Трубин, 2007).

Окрестность элемента изображения $\nu_4^{(l)}$ при моделировании последовательности

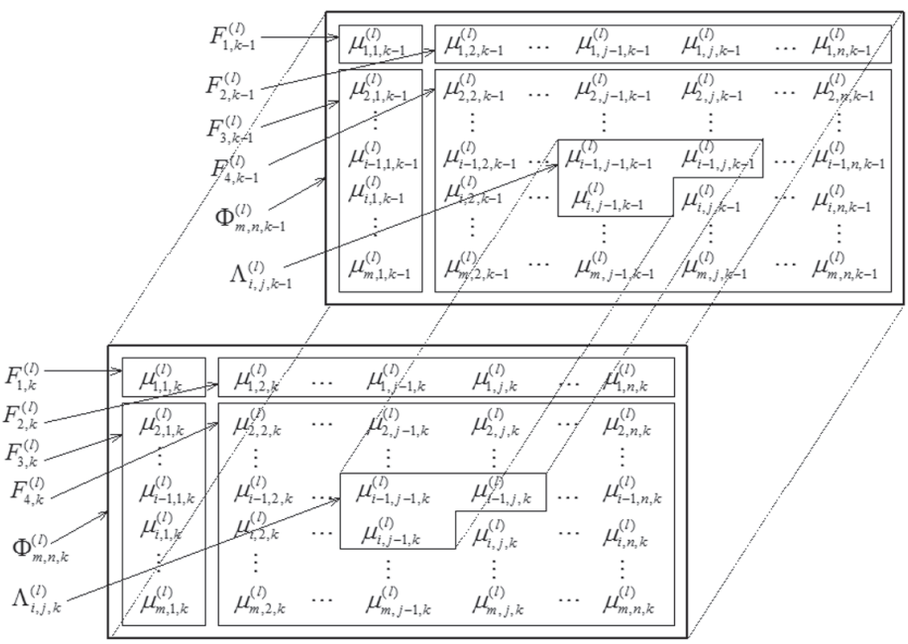


Рис. 3. ММ последовательности РДИ в исходной ВП МЦИ

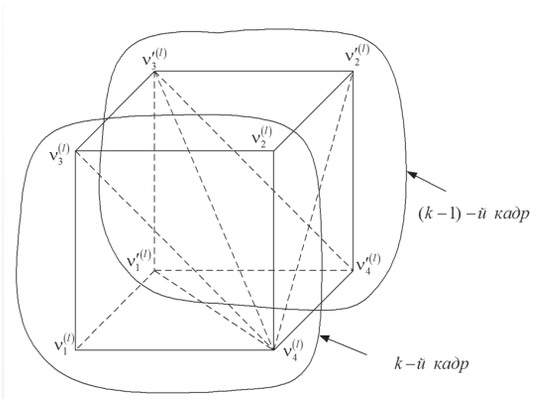
РДИ возрастает до семи соседних пикселей $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}=\left\{\nu_1^{(l)};\nu_2^{(l)};\nu_3^{(l)};\nu_1'^{(l)};\nu_2'^{(l)};\nu_3'^{(l)};\nu_4'^{(l)}\right\}$ (*рис. 4*). Сплошными и пунктирными линиями указаны корреляционные связи между бинарными пикселями РДИ в ВП МЦИ, входящими в окрестность $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}$ элемента $\nu_4^{(l)}$.

По условию, каждая последовательность РДИ в ВП МЦИ представляет собой трехмерную цепь Маркова, образованную суперпозицией трех одномерных ортогональных цепей Маркова, поэтому информация, содержащаяся между элементами изображений $\nu_1'^{(l)},\nu_2'^{(l)},\nu_3^{(l)},\nu_3'^{(l)}$ относительно пикселя $\nu_4^{(l)}$, является избыточной. Тогда, выражение для информации между пикселями ГРЦИ $\nu_4^{(l)}$ и $\nu_1^{(l)},\nu_2^{(l)},\nu_4'^{(l)}$ примет вид:

$$I\left(\nu_1^{(l)},\nu_2^{(l)},\nu_4'^{(l)},\nu_4^{(l)},\right)=\log\frac{w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_1^{(l)}\right)\cdot w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_4'^{(l)}\right)\cdot w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_2^{(l)}\right)\cdot w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_3'^{(l)}\right)}{w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_3^{(l)}\right)\cdot w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_1'^{(l)}\right)\cdot w\left(\nu_4^{(l)}\middle|\nu_2'^{(l)}\right)},\qquad(2)$$

где $w(\cdot)$ – плотности вероятностей переходов от одного состояния к другому соседнему за один шаг смены состояний трехмерной цепи Маркова.

Плотность вероятности переходов для трехмерной цепи Маркова с четырьмя состоя-



$$\nu_1^{(l)} = \mu_{i,j-1,k}^{(l)}, \qquad \nu_1'^{(l)} = \mu_{i,j-1,k-1}^{(l)},$$
$$\nu_2^{(l)} = \mu_{i-1,j,k}^{(l)}, \qquad \nu_2'^{(l)} = \mu_{i-1,j,k-1}^{(l)},$$
$$\nu_3^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k}^{(l)}, \qquad \nu_3'^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k-1}^{(l)},$$
$$\nu_4^{(l)} = \mu_{i,j,k}^{(l)}, \qquad \nu_4'^{(l)} = \mu_{i,j,k-1}^{(l)}.$$

Рис. 4. Окрестность пикселя $\nu_4^{(l)}$ при моделировании ГРДИ видеопоследовательности МЦИ

ниями, которой аппроксимируется последовательность ГРДИ в преобразованной ВП МЦИ, полностью определяется матрицей вероятностей переходов $\Pi^{(l)}$, элементы которой имеют вид:

$$\pi_{ijklmnqr} = \pi^{(l)}\Big(\nu_4^{(l)} = M_1^{(l)} \Big| \nu_1^{(l)} = M_j^{(l)}; \nu_2^{(l)} = M_k^{(l)}; \nu_3^{(l)} = M_l^{(l)}; \nu_1'^{(l)} = M_m^{(l)};$$
$$\nu_2'^{(l)} = M_n^{(l)}; \nu_3'^{(l)} = M_q^{(l)}; \nu_4'^{(l)} = M_r^{(l)}\Big),\ i, j, k, l, m, n, q, r = \overline{1,2}. \tag{3}$$

При известных матрицах ${}^1\Pi^{(l)}, {}^2\Pi^{(l)}, {}^4\Pi^{(l)}$ для вычисления элементов матрицы $\Pi^{(l)}$ необходимо предварительно вычислить матрицы:

$${}^3\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^2\Pi^{(l)}; \quad {}^5\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)};$$
$${}^6\Pi^{(l)} = {}^2\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)}; \quad {}^7\Pi^{(l)} = {}^3\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^2\Pi^{(l)} \cdot {}^4\Pi^{(l)},$$

определяющие статистическую связь элементов $\nu_3^{(l)}, \nu_1'^{(l)}, \nu_2'^{(l)}, \nu_3'^{(l)}$ с элементом $\nu_4^{(l)}$ соответственно.

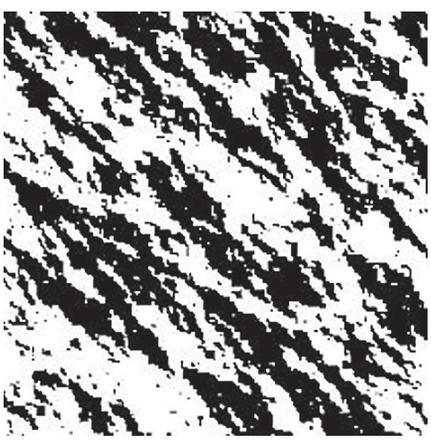
Так как окрестность элемента $\nu_4^{(l)}$ содержит 7 элементов, то, учитывая, что значения элементов матриц ${}^3\Pi^{(l)}$, ${}^5\Pi^{(l)}$, ${}^6\Pi^{(l)}$, ${}^7\Pi^{(l)}$ определяются значениями элементов матриц ${}^1\Pi^{(l)}$, ${}^2\Pi^{(l)}$, ${}^4\Pi^{(l)}$, число строк матрицы $\Pi^{(l)}$ равно $2^3 = 8$, а матрица $\Pi^{(l)}$ принимает вид:

$$\Pi^{(l)} = \begin{bmatrix} \pi_{iiiiiiii}^{(l)} & \pi_{iiijiiii}^{(l)} & \pi_{iijiiii}^{(l)} & \pi_{iijjiiii}^{(l)} & \pi_{ijiiiiii}^{(l)} & \pi_{ijijiiii}^{(l)} & \pi_{ijjiiiii}^{(l)} & \pi_{ijjjiiii}^{(l)} \\ \pi_{jiiiiiii}^{(l)} & \pi_{jiijiiii}^{(l)} & \pi_{jijiiiii}^{(l)} & \pi_{jijjiiii}^{(l)} & \pi_{jjiiiiii}^{(l)} & \pi_{jjijiiii}^{(l)} & \pi_{jjjiiiii}^{(l)} & \pi_{jjjjiiii}^{(l)} \end{bmatrix}^T;\ i, j = \overline{1,2};\ i \neq j.$$

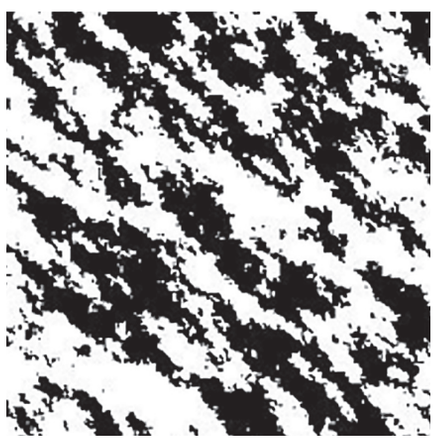
Значения элементов матрицы $\Pi^{(l)}$ (3) могут быть вычислены в соответствии с (2). Например, вычисления элементов первой строки матрицы $\Pi^{(l)}$ имеют вид:

$$\pi_{iiiiiiii}^{(l)} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}, \quad \pi_{jiiiiiii}^{(l)} = \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}, \quad i \neq j.$$

Вычисление остальных элементов матрицы $\Pi^{(l)}$ осуществляется в соответствии со значениями элементов окрестности $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}$ по априорно известным статистическим характеристикам исходной ВП МЦИ. Аналогично можно записать формулы для вычисления элементов матрицы $\Pi^{(l)}$ при различных сочетаниях значений пикселей окрестности $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}$. На *рис. 5а, б* представлены 1 и 5 кадры видеопоследовательности двоичных искусственных РДИ$^{(l)}$ $\left(l=\overline{1,g}\right)$, полученных с помощью разработанной ММ при условии, что матрицы ${}^{1}\Pi^{(l)} = {}^{2}\Pi^{(l)} = {}^{4}\Pi^{(l)}$ равны, т.е. ${}^{1}\pi_{ii}^{(l)} = {}^{2}\pi_{ii}^{(l)} = {}^{4}\pi_{ii}^{(l)} = 0,9$ $\left(i=\overline{1,2}\right)$, из которых видно, что структура искусственных изображений однородна, что подтверждают оценки ${}^{1}\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ и ${}^{2}\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$, вычисленные по изображениям в каждом из приведенных кадров видеопоследовательности. Искусственное панхроматическое g-разрядное МЦИ складывается из g искусственных РДИ.



а) Кадр 1, ${}^{1}\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 0,8979$ ${}^{2}\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 0,8936$



б) Кадр 5, ${}^{1}\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 0,8993$ ${}^{2}\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 0,8997$

Рис. 5. Кадры 1, 5 последовательности искусственных РДИ, при ${}^{1}\pi_{ii}^{(l)} = {}^{2}\pi_{ii}^{(l)} = {}^{4}\pi_{ii}^{(l)} = 0,9$

Алгоритм трехмерной нелинейной фильтрации ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, с двумя однотипными РДИ от двух соседних кадров ВП МЦИ

Алгоритм трехмерной нелинейной фильтрации преобразованной ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, передаваемых МФМ сигналами, имеет вид:

$$\begin{aligned} u_i(v_4) = &\left[f\left(M_i(v_4)\right) - f\left(M_4(v_4)\right)\right] + u_i(v_1) + z_i\left(u(v_1), {}^{1}\pi_{ij}\right) + u_i(v_2) + z_i\left(u(v_2), {}^{2}\pi_{ij}\right) + \\ &+ u_i(v_4') + z_i\left(u(v_4'), {}^{4}\pi_{ij}\right) + u_i(v_3') + z_i\left(u(v_3'), {}^{7}\pi_{ij}\right) - u_i(v_3) - z_i\left(u(v_3), {}^{3}\pi_{ij}\right) - \\ &- u_i(v_1') + z_i\left(u(v_1'), {}^{5}\pi_{ij}\right) - u_i(v_2') + z_i\left(u(v_2'), {}^{6}\pi_{ij}\right), \ i=\overline{1,3}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $u_j(v_4) = \ln\left[\dfrac{p_j(v_4)}{p_N(v_4)}\right]$ $\left(j=\overline{1,3}\right)$; $p_j(v_4)\left(j=\overline{1,N}\right)$ – апостериорная вероятность состояния дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ММ ГРДИ; $f\left(M_j(v_4)\right) - f\left(M_N(v_4)\right)$ $\left(j=\overline{1,N-1}\right)$ – разность логарифмов функции правдоподобия

состояний дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ГРДИ; $u(v_i)$ $\left(i=\overline{1,N-1}\right)$ – совокупность $u_1(v_i)$, $u_2(v_i)$, …, $u_{N-1}(v_i)$; $z_j(\cdot)$ – нелинейная функция вида:

$$z_j\left(u(v_l),{}^l\pi_{ij}\right)=\ln\left[\frac{\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_l)-u_j(v_l)\right){}^l\pi_{ij}\right\}+\exp\left(-u_j(v_l)\right){}^l\pi_{Nj}+\pi_{jj}}{\sum\limits_{i=1}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_l)\right){}^l\pi_{iN}\right\}+\pi_{NN}}\right],\ \left(j,l=\overline{1,3}\right);\quad (5)$$

$$z_j\left(u(v_l'),{}^{(l+4)}\pi_{ij}\right)=\ln\left[\frac{\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_l')-u_j(v_l')\right){}^l\pi_{ij}\right\}+\exp\left(-u_j(v_l')\right){}^l\pi_{Nj}+\pi_{jj}}{\sum\limits_{i=1}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_l')\right){}^l\pi_{iN}\right\}+\pi_{NN}}\right],\ \left(j,l=\overline{1,3}\right);\quad (6)$$

$$z_j\left(u(v_4'),{}^4\pi_{ij}\right)=\ln\left[\frac{\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_4')-u_j(v_4')\right){}^4\pi_{ij}\right\}+\exp\left(-u_j(v_4')\right){}^4\pi_{Nj}+\pi_{jj}}{\sum\limits_{i=1}^{N-1}\left\{\exp\left(u_i(v_4')\right){}^4\pi_{iN}\right\}+\pi_{NN}}\right],\ \left(j=\overline{1,3}\right).\quad (7)$$

Вся априорная информация о статистической зависимости состояний дискретного параметра МФМ сигнала сосредоточена в слагаемых вида (5) – (7), где ${}^l\pi_{ij}\left(i,j=\overline{1,4},\ l=\overline{1,3}\right)$– элементы матриц вероятностей перехода элементов ГРДИ по горизонтали ${}^1\Pi$, вертикали ${}^2\Pi$ и диагонали ${}^3\Pi$ соответственно.

В качестве критерия различения состояний элементов МЦИ примем критерий максимума логарифма отношения апостериорных вероятностей $u_j(v_4)$, в соответствии с которым, если $u_j(v_4)>u_i(v_4)$, $i,j=\overline{1,3}$, $i\neq j$, то принимается решение о состоянии элемента изображения $v_4=M_j$, если все значения $u_j(v_4)\leq 0$ $\left(j=\overline{1,3}\right)$, то принимается решение о состоянии элемента изображения $v_4=M_4$.

Для демонстрации работы алгоритма (4) на *рис. 6* представлены результаты нелинейной фильтрации на примере преобразованной ВП МЦИ, включающих два соседних кадра исходной ВП восьмиразрядных МЦИ размером 1280×720 пикселей при отношении сигнал/шум по мощности сигнала на входе нелинейного фильтра – 6 дБ. На *рис. 6а, б* показаны два соседних кадра исходной ВП МЦИ, на *рис. 6в, г* приведены искаженные МЦИ, на *рис. 6д, е* приведены восстановленные нелинейной фильтрацией МЦИ, показаны значения среднеквадратической ошибки для искаженных и восстановленных МЦИ.

Анализ результатов сокращения времени передачи ВП МЦИ

Исследования разработанных алгоритмов нелинейной фильтрации ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, показали, что:

1. Объединение в ГРДИ РДИ с одинаковыми номерами двух соседних кадров исходной ВП МЦИ с большой межкадровой корреляцией позволяет существенно увеличить

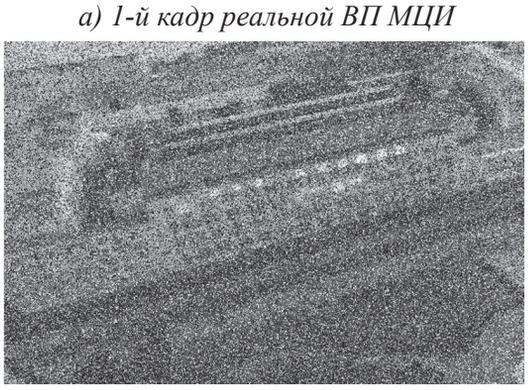
статистическую избыточность ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, реализация которой даст возможность скомпенсировать большие потери помехоустойчивости приема ВП МЦИ, передаваемых МФМ сигналами (значение СКО сократилось в 9 раз), и потенциально можно сократить время передачи исходной ВП МЦИ в четыре и более раз за счет объединения более двух соседних кадров исходной ВП МЦИ;

2. Учитывая экспоненциальный характер корреляционной функции ВП МЦИ, статистическая избыточность ГРДИ, включающих более трех РДИ соседних кадров исходной ВП МЦИ, увеличивается незначительно, поэтому скомпенсировать большие потери помехоустойчивости приема исходной ВП МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, не представляется возможным.

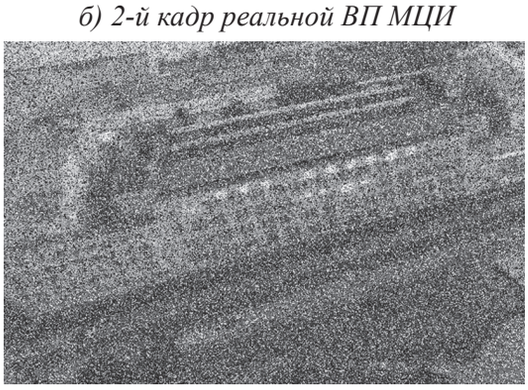
3. С увеличением числа объединенных кадров в преобразованной ВП МЦИ значительно усложняются алгоритмы нелинейной фильтрации ВП МЦИ, состоящих из ГРДИ, на приемной стороне радиоканала.

а) 1-й кадр реальной ВП МЦИ

б) 2-й кадр реальной ВП МЦИ



в) фрагмент искаженного 1-го кадра ВП МЦИ, СКО=4675



г) фрагмент искаженного 2-го кадра ВП МЦИ, СКО=4712

д) фрагмент восстановленного 1-го кадра ВП МЦИ, СКО=328

е) фрагмент восстановленного 2-го кадра ВП МЦИ, СКО=346

Рис. 6. Пример нелинейной фильтрации реальной ВП МЦИ

Литература

1. *Амиантов И.Н.* Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Сов. радио, 1971. 416 с.
2. *Петров Е.П., Трубин И.С.* Математические модели видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 6. С. 3.
3. *Петров Е.П., Трубин И.С., Частиков И.А.* Нелинейная фильтрация видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений марковского типа // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 3. С. 54–86.
4. *Стратонович Р.Л.* Условные процессы Маркова // Теория вероятностей и ее применение. 1960. Т. 5. № 2.
5. *Petrov E.P., Medvedeva E.V., Trubin I.S., Smolskiy S.M.* Mathematical Models of Video-Sequences of Digital Half-Tone Images // Integrated Models for Information Communication Systems and Networks: Design and Development. 2013. С. 207–241.

Method of simultaneous transmission of groups of video frames from mini unmanned aerial vehicles

E.P. Petrov, N.L. Kharina, E.D. Rzhanikova

Vyatka State University, Kirov 610000, Russia
E-mail: eppetrov@mail.ru

Mini unmanned aerial vehicles (MUAV) used in Earth remote sensing have limited energy resources. Their wide use is constrained by the difficulty of video data transmission in a real time mode. Video data can be represented as sequences of still image frames being high resolution digital images. Using the known methods of compression of video sequences on board a MUAV to reduce the time of transmission is impractical because of restricted energy resources. In this paper, a method to reduce video sequences transmission time is suggested. This method consists in uniting N neighbouring frames of video sequence on board a MUAV without computing operations and using multiposition phase-shift keyed (MPSK) signals for transmission of video sequences over radio waves. Thus, the transmission time is reduced N times. A disadvantage of MPSK signals is the decrease of receiving noise stability by 3 dB at each division of a phase of MPSK signals by half. A method of compensation of noise stability losses of MPSK signals receiving is suggested. This method utilizes statistical redundancy of video sequence caused by spatial and temporal correlation. The research has shown that the time of video sequence transmission can be reduced by four times by uniting four frames of a video sequence and using 16-PSK signals for its transmission without noise stability loss compared to binary phase-shift keyed signals. The application of higher-order PSK signals to reduce the time of video sequence transmission is inadvisable since it is impossible to compensate for noise stability loss because of a limited amount of statistical redundancy in video data.

Keywords: mathematical model of video sequence, mini unmanned aerial vehicle, high resolution digital image, the Markov chain with several states, the algorithm of three-dimensional nonlinear filtering, multiposition phase-shift keyed signals

Accepted: 06.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-49-57

References

1. Amiantov I.N., *Izbrannye voprosy statisticheskoj teorii svjazi* (Selected Questions of the Statistical Theory of Communication), Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 416 p.
2. Petrov E.P., Trubin I.S., Matematicheskie modeli videoposledovatel'nostei tsifrovykh polutonovykh izobrazhenii (Mathematical models of video sequences of digital halftone images), *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2007, No. 6, p. 3.
3. Petrov E.P., Trubin I.S., Chastikov I.A., Nelineinaya fil'tratsiya videoposledovatel'nostei tsifrovykh polutonovykh izobrazhenii markovskogo tipa (Nonlinear filtering of video sequences of digital halftone images of Markovian type), *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2007, No. 3, pp. 54–86.
4. Stratonovich R.L., Uslovnye protsessy Markova (Conditional Markovian Processes), *Teoriya veroyatnostei i ee primenenie*, 1960, Vol. 5, No. 2.
5. Petrov E.P., Medvedeva E.V., Trubin I.S., Smolskiy S.M., Mathematical models of video-sequences of digital half-tone images, In: *Integrated Models for Information Communication Systems and Networks: Design and Development*, 2013, pp. 207–241.